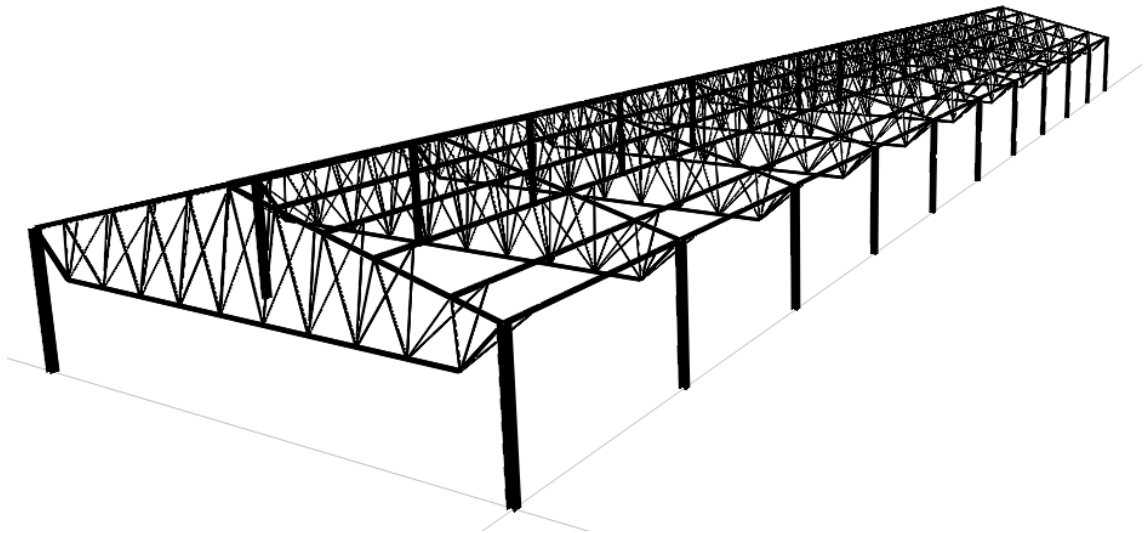


UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



**ACÇÃO DO VENTO E SEGURANÇA
ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS
DOTADOS DE ELEMENTOS FUSÍVEIS NA
ENVOLVENTE**

João Pedro Rosa da Cruz

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil - Ramo de Estruturas

Orientador: Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva

Co-Orientador: Doutor Jorge Alberto Gil Saraiva

01-10-2010

Para o meu pai...

Agradecimentos

Concluída esta dissertação gostava de nela incluir algumas palavras de gratidão:

Ao Professor Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva pela confiança e apoio na execução deste trabalho. A sua disponibilidade foi total e os seus ensinamentos valiosos;

Ao Professor Doutor Jorge Alberto Gil Saraiva, pela sua enorme paciência, pela alegria com que partilha todo o seu conhecimento;

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e aos professores do curso de Engenharia Civil, pelos anos de aprendizagem que me proporcionaram;

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil e à equipa do Sector de Aerodinâmica, em particular ao Doutor Fernando Marques da Silva e à Engenheira Iara Pereira que me deram todo o apoio possível, partilhando conhecimentos e experiência no decorrer dos ensaios para esta tese;

Aos meus avós que me ensinaram tudo o que sinto;

Ao meu pai, o Homem que me ensinou a ser Homem, que plantou em mim a honra e a honestidade e que me mostrou que, quando lutamos por algo, o coração é a arma mais poderosa;

À minha mãe e ao meu irmão a quem devo a força que tenho e que me move;

À minha namorada que me apoia de forma incondicional, sempre bondosa e paciente;

Aos meus tios que me motivaram fortemente e me proporcionaram momentos de descontração fundamentais (e em especial à tia Ana, sem a qual este trabalho não existiria);

A todos os meus colegas e amigos, em particular aos Engenheiros Rodrigo Pereira e Diogo Mouro e à Engenheira Sara Lampreia, pela paciência que tiveram em ler o meu trabalho e pelas sugestões que me deram.

Sumário

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação consiste no estudo da acção do vento em pavilhões industriais.

O procedimento consiste na aplicação de conceitos multidisciplinares colhidos da análise de estruturas, dinâmica de estruturas, dinâmica de fluidos, física das construções, análise dimensional e modelação física, com o objectivo de criar uma solução inovadora para a optimização estrutural.

Introduz-se o conceito de fusível aplicado a este tipo de problema da engenharia de estruturas e demonstra-se o seu dimensionamento, com base em ensaios em túnel de vento e em paralelo com os eurocódigos.

Conclui-se que ao incluir elementos fusíveis na envolvente de pavilhões industriais é possível reduzir o peso próprio da estrutura de forma muito considerável e respeitando, ou até aumentando, as margens de segurança patentes nos eurocódigos.

Palavras Chave: Optimização estrutural, fusível estrutural, modelação física, túnel de vento, acção do vento, eurocódigos, pavilhões industriais, estrutura em aço e ventilação.

Abstract

This dissertation consists of a study of industrial buildings subject to wind action.

The procedure is based on the application of multidisciplinary concepts collected from structural analysis, structural dynamics, fluid dynamics, dimensional analysis and physical modeling, with the purpose of structural optimization through a creative solution and innovative thinking.

The concept of fuse applied to this kind of structure is introduced while all calculation and design is exemplified, based on wind tunnel testing, and compared to the eurocode- based design.

Results show that the use of fuse elements on the envelope of industrial buildings leads to a considerable weight reduction on structural elements, while security margins established on the eurocodes are not only respected but improved.

Key words: Structural optimization, structural fuse, physical modeling, wind tunnel, wind action, eurocodes, industrial buildings, steel structure e ventilation.

Simbologia

Aref – Área de referência

a – Variável característica

b – Variável característica

C_{dir} – Coeficiente de direcção

C_r – Coeficiente de rugosidade

C_{pe} – Coeficiente de pressão externa

C_{pi} – Coeficiente de pressão interna

C_{season} – Coeficiente de época ou sazão

$C_s C_d$ – Factor estrutural

D – Dimensão característica

E – Módulo de Elasticidade

Eu – Número de Euler

F_w – Força actuante por acção do vento

Fr – Número de Froude

g – Aceleração gravítica

K_A – Constante da parábola (relação entre esforço e velocidade do vento) do elemento A

M_{Rd} – Momento resistente

M_{Sd} – Momento actuante

P_e – Pressão actuante no exterior

P_i – Pressão actuante no interior

Q – Caudal

q – Pressão dinâmica do vento

q_p – Pressão dinâmica à velocidade dita de pico

Re – Número de Reynolds

St – Número de Strouhal

U – Velocidade de escoamento

v_b – Velocidade básica do vento

$v_{b,0}$ – Valor fundamental da velocidade básica do vento

v_m – Velocidade média do vento

w_e – Carga distribuída resultante da acção do vento no exterior

w_i – Carga distribuída resultante da acção do vento no interior

X – Grandeza física mecânica

z – Altura de referência

ϑ – Viscosidade cinemática

ξ – Coeficiente de perda de pressão

Π – Número adimensional

P – Massa volúmica

Θ – Coeficiente de ventilação

σ – Tensão

Índice

Agradecimentos.....	5
Sumário	7
Abstract	9
Simbologia.....	11
Índice	13
Índice de Ilustrações.....	15
Índice de Tabelas	17
Capítulo 1 - Introdução	19
1.1 – Objectivos	19
1.2 - Estrutura da dissertação.....	20
Capítulo 2 – Estado da Arte	21
2.1 - Engenharia do Vento: Definição e história	21
2.2 - Modelos físicos e a experimentação na actualidade	27
2.3 - Acção do vento: O caso particular das edificações baixas e dos pavilhões industriais	29
2.4 – O conceito de fusível aplicado à estrutura em estudo	33
2.5 - Ventilação natural	34
Capítulo 3 – Fundamentos Teóricos	37
3.1 - Coeficientes de pressão devidos à acção do vento em estruturas de baixa elevação de acordo com o EC	37
3.2 - Coeficientes de pressão em estruturas de baixa elevação determinados com recurso a ensaios em túnel de vento	45
3.2.1 – Teoria da Semelhança	45
3.2.2 - Hipótese da camada limite.....	47
3.2.3 - Teorema de Vaschy-Buckingham ou dos Π 's	50
3.2.4 - Os números de Euler e Reynolds nas equações de Navier-Stokes	55
3.3 - Coeficientes de pressão interna como resultado da ventilação natural	56
Capítulo 4 – Cálculos Justificativos	61
4.1 - Descrição da Estrutura	61
4.2 - Modelo Computacional em SAP2000.....	64
4.3 - Acção do vento em estruturas de baixa elevação de acordo com o Eurocódigo	68
4.3.1 - Modelo Computacional com acções dimensionadas pelo Eurocódigo	70
4.4 - Coeficientes de pressão determinados por ensaios no túnel de vento	71
4.4.1 - Mapas de linhas isobáricas.....	80

4.4.2 - Coeficientes de pressão interna e ventilação natural devido ao fusível	80
4.5 - Modelo computacional sujeito a carregamento de acordo com o modelo físico	83
4.6 - Identificação dos elementos estruturais críticos	84
Capítulo 5 - Resultados	87
5.1 - Consequências da abertura do fusível	87
5.2 - Análise detalhada de um elemento estrutural crítico	87
Capítulo 6 – Conclusões	93
Referências e Bibliografia.....	95
ANEXO I	99
ANEXO II	103
ANEXO III	109
ANEXO IV	111
ANEXO V	117

Índice de Ilustrações

Ilustração 2.1 - Habitação cónica Celta. (fonte: http://www.tslr.net/2007/11/celtic-round-house.html)	21
Ilustração 2.2 - Colapso de Tay Bridge. (fonte: http://www.rocketboom.com/blog/history)	22
Ilustração 2.3 - Túnel de Vento dos irmãos Wright. (fonte: www.first-to-fly.org)	23
Ilustração 2.4 - Tacoma Narrows Bridge (fonte: http://rachel.ac/sat/math/3DFSdocs/TacomaNarrowsBridge.htm)	24
Ilustração 2.5 - Jack E. Cermak (à direita) e Alan Davenport (à esquerda) trabalhando nos modelos aeroelásticos do World Trade Center. (fonte: www.aawe.org)	25
Ilustração 2.6 - Imagem de satélite do furacão Katrina. (fonte: nasa-satellites.blogspot.com)	26
Ilustração 2.7 - Torres eólicas offshore. (fonte: http://lacoastpost.com/blog)	27
Ilustração 2.8 - Modelo CFD (fonte: http://www.renewableenergyworld.com)	28
Ilustração 2.9 - Esquema baseado em ensaios em túnel de vento (fonte: http://arch.ced.berkeley.edu/kap/gallery/gal023.html)	29
Ilustração 2.10 - Simulador de furacões da Universidade da Florida (fonte: http://news.bbc.co.uk/2/hi/7441481.stm)	29
Ilustração 2.11 - Convenção de direcções e sinais para a pressão interna e externa num edifício sujeito à acção do vento (fonte: [4])	31
Ilustração 2.12 - Cobertura de pavilhão industrial destruída pela acção do vento (fonte: http://roof-contractor.org)	32
Ilustração 2.13 - Direcções de convecção de ar quente e ar frio numa habitação tipo (fonte: http://www.ncgoesgreen.com/images/convection_house_illustration.jpg)	35
Ilustração 2.14 - Esquema simplificado de ventilação natural com abertura a barlavento e a sotavento. (fonte: http://www.nordesteural.com.br)	35
Ilustração 3.1 - Perfil de velocidade a considerar. (fonte: [26])	39
Ilustração 3.2 - Velocidade fundamental do vento. Valores a considerar no espaço Europeu (fonte: [26])	41
Ilustração 3.3 - Convenção de sinais de pressão interna e externa (fonte: [26])	42
Ilustração 3.4 - Zonamento de paredes em função das dimensões do edifício e da incidência do vento. (fonte: [26])	42
Ilustração 3.5 - Convenção de sinais para a inclinação da cobertura (fonte: [26])	43
Ilustração 3.6 - Zonamento da cobertura em função das suas dimensões e da incidência do vento. (fonte: [26])	44
Ilustração 3.7- Esquematização da separação entre camada limite e escoamento livre. (fonte: [40])	48
Ilustração 3.8 - Esquematização da variação da espessura da camada limite numa placa de uso comum em ensaios de túnel de vento. (fonte: [40])	49
Ilustração 3.9 - Coeficientes de arrastamento para um cilindro e uma placa plana normal ao escoamento, função do número de Reynolds (fonte: [25])	50
Ilustração 3.10 - Convenção de direcções de escoamento da ventilação natural.	57
Ilustração 4.1 - Vista interior do pavilhão: Trelíças e cobertura	61
Ilustração 4.2 - Pormenor de ligação na trelíça.	62
Ilustração 4.3 - Vista de pilar e aberturas.	62
Ilustração 4.4 - Geometria do alçado do edifício	63
Ilustração 4.5 - Esquematização da estrutura dos pórticos	64
Ilustração 4.6 - Definição da malha de referência	65

Ilustração 4.7 - Configuração de materiais.....	66
Ilustração 4.8 - Configuração dos perfis a utilizar	66
Ilustração 4.9 - Configuração de secções que não constam do catálogo do programa.....	67
Ilustração 4.10 - Vistas tridimensionais do modelo computacional da estrutura.....	67
Ilustração 4.11 - Definição dos carregamentos	70
Ilustração 4.12 - Verificação da segurança pelo EC3	71
Ilustração 4.13 - Tunel de vento do Laboratório de Aerodinâmica do LNEC	72
Ilustração 4.14 - Mapa das tomadas de pressão instaladas no modelo	73
Ilustração 4.15 - Modelo fixado na placa giratória, dentro do túnel.....	73
Ilustração 4.16 - Numeração dos pontos de leitura.....	74
Ilustração 4.17 - Saída dos tubos, ligados às tomadas de pressão, na parte inferior da placa giratória e para fora do túnel.	75
Ilustração 4.18 - Células de medição de pressão, com capilares flexíveis para ligação dos tubos.....	75
Ilustração 4.19 - Ligação dos tubos flexíveis numerados às células de medição de pressão.	76
Ilustração 4.20 - Tubo de Pitot-Prandtl.....	77
Ilustração 4.21 - Módulo de processamento de dados (marca comercial PSI).....	78
Ilustração 4.22 - Isobáricas a 0°	80
Ilustração 4.23 - Pormenor de Isobáricas a 0°. Valores máximos de sucção na cobertura. ..	82
Ilustração 4.24 - Localização do fusível (a encarnado) e da abertura na face a barlavento (a preto).	82
Ilustração 4.25 - Configuração de carregamentos no modelo computacional	83
Ilustração 4.26 - Definição das combinações de carregamento.....	84
Ilustração 4.27 - Vista tridimensional do modelo computacional. Elementos críticos.	84
Ilustração 4.28 - Vista do pórtico do modelo computacional. Elementos críticos.....	85
Ilustração 5.1 - Elemento crítico em estudo. IPE200.	87
Ilustração 5.2 - Dados dos rácios fornecidos pelo modelo computacional.....	88
Ilustração 5.3 - Dados de esforços fornecidos pelo modelo computacional, respeitantes ao elemento crítico em estudo.	88
Ilustração 5.4 - Gráfico de esforço no elemento crítico versus velocidade do vento	89
Ilustração 5.5 - Gráfico de esforço no elemento crítico versus velocidade do vento, considerando a activação do fusível aos 20 m/s.....	90
Ilustração 5.6 - Gráfico de esforço no elemento crítico versus velocidade do vento, considerando a activação do fusível aos 11 m/s.....	91

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Valores de Z_0 e Z_{min} a considerar, em função da categoria do terreno. (fonte: [26])	38
Tabela 3.2- Coeficientes de pressão externa em paramentos verticais (fonte: [26])	43
Tabela 3.3 - Coeficientes de pressão externa em coberturas. (fonte: [26])	44
Tabela 3.4 - Alguns números adimensionais. (fonte: [30])	47
Tabela 3.5 - Variáveis no sistema MLT	52
Tabela 4.1 - Características do aço S355	64
Tabela 4.2 - Valores de C_{pe} nos paramentos verticais.....	69
Tabela 4.3 - Valores de C_{pe} na cobertura	69
Tabela 4.4 – C_{pe} 's para incidência 0°	79

Capítulo 1 - Introdução

1.1 – Objectivos

O objectivo deste trabalho é desenvolver uma abordagem de dimensionamento da estrutura de pavilhões industriais à acção do vento (acção dominante para este tipo de estruturas), visando a diminuição do seu peso próprio e consequentemente uma redução do seu custo. A abordagem tem um carácter inovador na medida que vai além do dimensionamento comum (baseado nos regulamentos), recorrendo a conhecimentos e soluções de outras áreas da engenharia, destacando-se o trabalho efectuado em ambiente laboratorial (ensaios em túnel de vento, em cooperação com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil) com o fim de obter uma distribuição de pressões na envolvente do edifício mais adequada que a proposta pelo Eurocódigo (EC).

Em vez de seguir, exclusivamente, o estabelecido nos EC's ([1] e [2]), faz-se uso da multidisciplinaridade (com conhecimentos de dinâmica de fluidos e modelação física) para criar uma solução que permite menores secções nos elementos estruturais e garantindo que os padrões de segurança estabelecidos pelos EC's continuam a ser respeitados com uma estrutura mais económica.

A solução proposta consiste na inclusão do que aqui se designa por elemento fusível (cujo conceito é descrito adiante, no Capítulo 2) na envolvente de edificações baixas de estrutura em aço e de revestimentos leves (em especial na cobertura), usualmente utilizadas como pavilhões industriais.

Trata-se de dotar o edifício de um dispositivo de segurança que quando activado, , permite reduzir as forças actuantes na envolvente por alteração dos valores da pressão interna. Estes podem ser determinados recorrendo à modelação das condições de ventilação natural para as forças actuantes na envolvente. Sabe-se, por experiência, que os conjuntos de pressões criadas pela acção do vento associada aos fenómenos de ventilação natural são

responsáveis pela cedência de coberturas e elementos estruturais neste tipo de pavilhões, podendo inclusivamente levar ao colapso total dos mesmos.

Este trabalho apresenta a metodologia a adoptar, define os procedimentos a seguir e exemplifica a sua aplicação, para um caso de incidência de vento (rumo), nomeadamente procedendo à análise detalhada dos efeitos da activação do fusível num elemento estrutural crítico.

1.2 - Estrutura da dissertação

O trabalho desenvolvido introduz os conceitos fundamentais que servem de base ao cálculo de uma solução de optimização estrutural.

A dissertação desenvolve-se ao longo de 6 capítulos, sendo que o primeiro é introdutório, apresentando a estruturação e os objectivos deste trabalho.

O segundo capítulo expõe os conceitos fundamentais ao desenvolvimento e compreensão do estudo proposto, apresentando uma breve história da evolução da Engenharia do Vento, assim como o estado do conhecimento na actualidade e o enquadramento deste estudo.

O terceiro capítulo consiste na apresentação da fundamentação teórica e da formulação a ser seguida nos cálculos posteriores.

O quarto capítulo descreve o procedimento seguido para o dimensionamento da estrutura a estudar (com base na observação de uma estrutura existente), assim como no desenvolvimento detalhado dos cálculos, modelação computacional, modelação física e descrição dos ensaios realizados.

No quinto capítulo apresentam-se os resultados obtidos e é feita uma análise exemplificativa de um elemento crítico.

No sexto e último capítulo discutem-se os resultados e conclui-se a dissertação com algumas propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Estado da Arte

2.1 - Engenharia do Vento: Definição e história

Desde a sua origem, a Engenharia Civil procura criar soluções de forma a proteger o Homem das várias agressões da natureza. A acção do vento em particular levou a que se distinguísse, dentro da Engenharia Civil, o ramo da Engenharia do Vento. De acordo com Cermak [26], a Engenharia do Vento consiste na “análise racional da interacção entre o vento na camada limite da atmosfera e o Homem e a sua obra na superfície da Terra”.

Do ponto de vista Histórico, segundo Baker [4], a evolução da Engenharia do Vento, na Europa, divide-se em cinco períodos fundamentais:

1. O Período Tradicional (até 1750) caracteriza-se pelo recurso a estruturas de funções fundamentalmente habitacionais, cujas formas eram influenciadas pelas crenças religiosas e hábitos herdados de geração em geração. Os episódios de tempestade e ventos fortes eram associados à ira dos deuses. O conceito de acção de cálculo não se aplica neste período uma vez que o conhecimento era baseado na experiência;

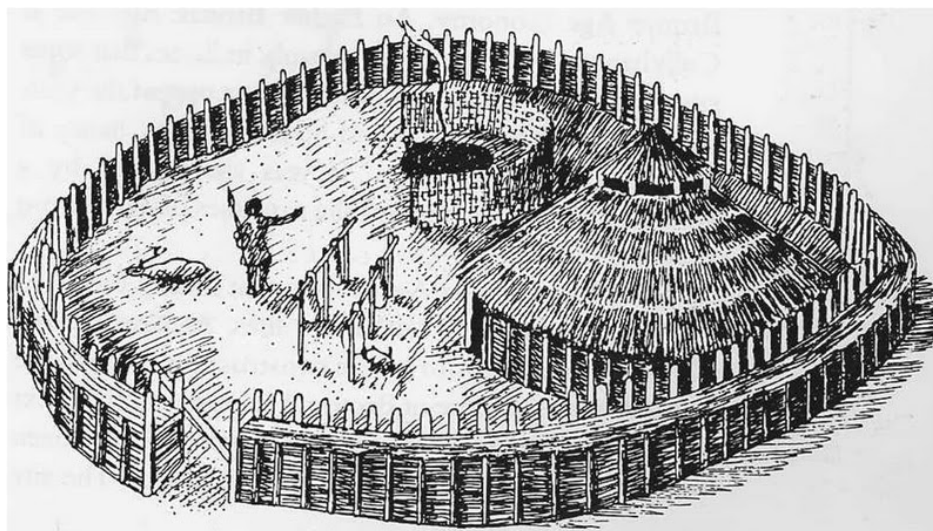


Ilustração 2.1 - Habitação cónica Celta. (fonte: <http://www.tslr.net/2007/11/celtic-round-house.html>)

2. O Período Empírico (de 1750 até 1900), potenciado pelo arranque da revolução industrial, revela um considerável crescimento do interesse pelo estudo da acção do vento. Este interesse é fruto da evolução providenciada, por um lado, pelos “avanços na área da hidrodinâmica pelas mãos de Euler, Newton, Bernoulli e mais tarde Navier” e pelos estudos de Watt que impulsionam a criação de mais e maiores pontes, capazes de suportar a circulação ferroviária (com vários episódios de colapso associados à acção do vento, como o caso de Tay Bridge). O conceito de acção de cálculo associado ao vento surge relacionado com a experiência, observação e análise de episódios de colapso;



Ilustração 2.2 - Colapso de Tay Bridge. (fonte: <http://www.rocketboom.com/blog/history>)

3. O Período de Estabelecimento (de 1900 até 1960) foi marcado pela evolução da Engenharia Militar. O aparecimento do túnel de vento (Ilustração 2.3) e o desenvolvimento da hipótese da Camada Limite de Ludwig Prandtl, juntamente com o recurso a ensaios à escala real, permitiram o desenvolvimento de técnicas de ensaio em ambiente laboratorial cada vez mais fiáveis, fomentando a criação de ensaios em túnel de vento em camada limite e a aplicação mais aprofundada da teoria da semelhança.

Em 1914, Edgar Buckingham publica um documento que aborda a semelhança física entre sistemas com base na análise dimensional.

Foi em 1940 que se deu o colapso da ponte de Tacoma Narrows. As imagens captadas por Frederick Farquharson (um dos engenheiros envolvidos no dimensionamento da ponte) e os seus estudos posteriores permitiram concluir que o desastre teria sido provocado por instabilidade devida à acção do vento.

Outro nome incontornável deste período é o de Sir Geoffrey Ingram Taylor, cujo trabalho na área da análise dimensional se revelou marcante. Em 1950, Taylor, demonstrou o potencial da aplicação da análise dimensional quando estimou a potência de uma explosão atómica (cujo valor era mantido em segredo pelo governo dos Estados Unidos) com base nos vídeos da explosão, tornados públicos em 1947.

No ano de 1952 nasce o conceito de análise inspeccional graças ao trabalho de Garrett Birkhoff.

Em suma, a acção do vento começa a ser estudada com base em modelação e cálculo de carregamentos equivalentes;

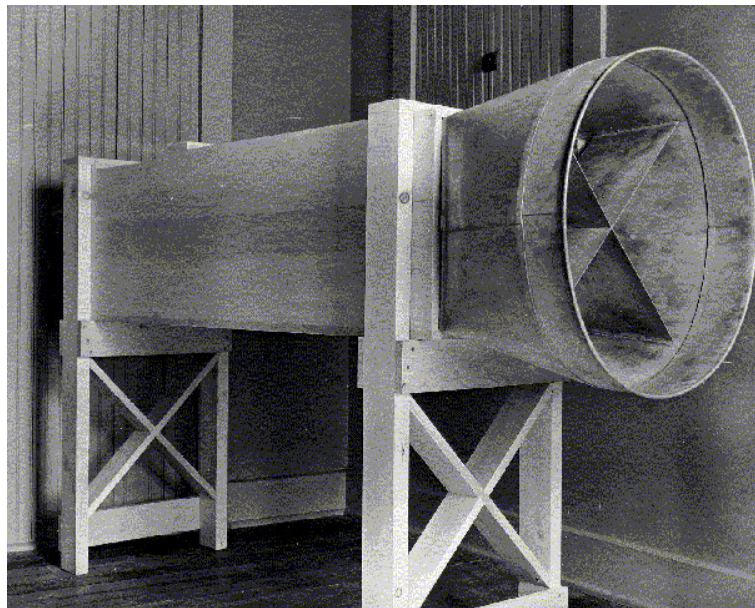


Ilustração 2.3 - Túnel de Vento dos irmãos Wright. (fonte: www.first-to-fly.org)

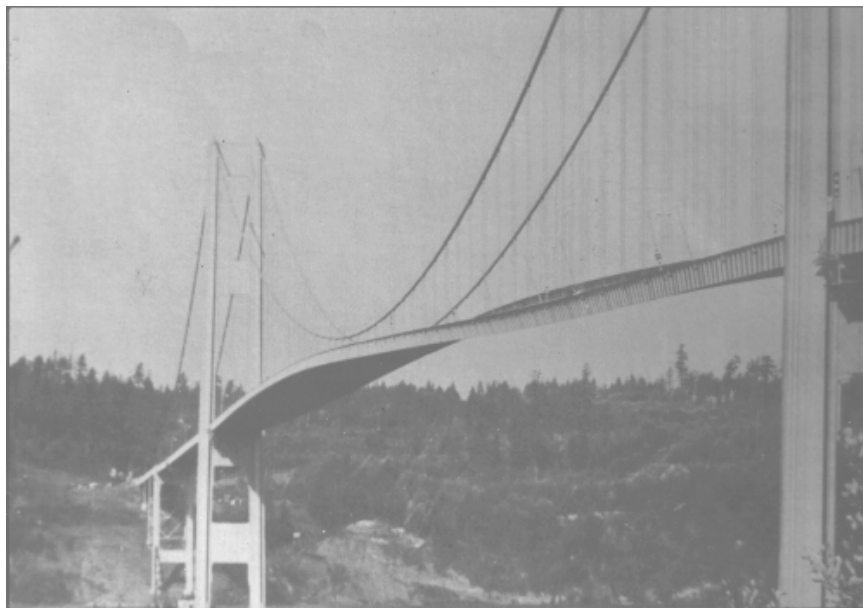


Ilustração 2.4 - Tacoma Narrows Bridge (fonte:

<http://rachel.ac/sat/math/3DFSdocs/TacomaNarrowsBridge.htm>)

4. O Período de Crescimento (de 1960 até 1980) está associado à prosperidade do pós-guerra e ao aumento de investimento governamental na investigação e educação. O número de universidades crescia a cada ano assim como o número de instituições dedicadas à investigação. A difusão crescente do conhecimento e das capacidades laboratoriais, associados ao desenvolvimento dos meios electrónicos (que permitiam uma mais rápida captação e armazenamento de dados) produziu resultados extraordinários na modelação física.

A partir do ano de 1965, os trabalhos de Jensen e Franck introduziram o recurso aos ensaios em túneis de camada limite (geração desta no interior de túneis aeronáuticos a partir de elementos de rugosidade) no estudo da acção do vento em edifícios de diversos formatos. Este trabalho seria precursor dos estudos de Alan Davenport, sobre edifícios industriais [5] de 1977 a 1990, e de Holmes, sobre edifícios de habitação em 1983 e 1994.

De referir que o contributo de Alan Davenport, no estudo da acção do vento em grandes edificações e estruturas e o seu estudo do carregamento sequencial por acção do vento são um marco na Engenharia do Vento;

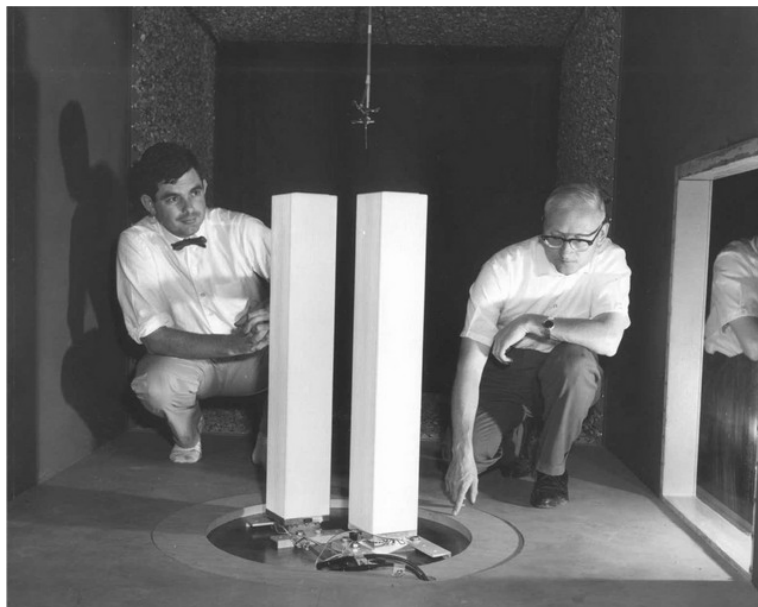


Ilustração 2.5 - Jack E. Cermak (à direita) e Alan Davenport (à esquerda) trabalhando nos modelos aeroelásticos do World Trade Center. (fonte: www.aawe.org)

5. O Período Moderno (de 1980 até aos dias de hoje) representa a continuidade dos frutos da evolução nas ferramentas computacionais e electrónicas.

Actualmente, a Engenharia do Vento orienta os seus esforços no sentido de criar soluções e métodos de previsão para lidar com os ventos e tempestades de força crescente, resultantes das alterações climáticas. Os códigos e regulamentos de dimensionamento são constantemente revistos, como resultado da evolução e inovação de soluções e materiais estruturais.

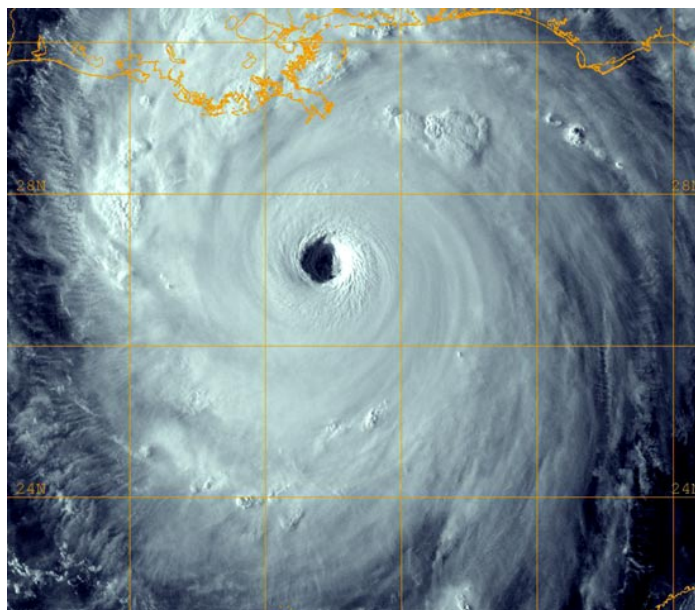


Ilustração 2.6 - Imagem de satélite do furacão Katrina. (fonte: nasa-satellites.blogspot.com)

Prevê-se que, no futuro, a investigação na área da Engenharia do Vento seja fortemente motivada pelas alterações climáticas. As mudanças de temperatura que se fazem sentir por todo o globo [6] e a incidência de fenómenos climáticos (como tempestades e furacões) em locais e intensidades pouco habituais, produzem efeitos devastadores em grande parte das edificações. Antecipa-se uma crescente aposta nas energias alternativas, dentro das quais o vento apresenta já um peso considerável, assim como um crescente esforço na tentativa de melhor prever eventos meteorológicos de risco [28]. Um exemplo do trabalho desenvolvido na previsão meteorológica é a ECMWF (European Centre for Medium-Range Forecasts) que baseia as suas previsões a médio prazo (cerca de dez dias de previsão) em complexos modelos numéricos e num minucioso levantamento de dados em tempo real [6].

Outro tema de elevada importância assenta nos estudos de optimização estrutural que procuram dotar os sistemas estruturais de solidez suficiente para resistir às solicitações

extremas das intempéries, ao mesmo tempo que se cria uma solução viável e sustentável do ponto de vista económico e ambiental.



Ilustração 2.7 - Torres eólicas offshore. (fonte: <http://lacoastpost.com/blog>)

2.2 - Modelos físicos e a experimentação na actualidade

Apesar dos regulamentos de dimensionamento, cujo uso está generalizado, serem o ponto de partida mais comum para o dimensionamento de uma estrutura sujeita a um determinado número de acções e condições, e apesar de os mesmos estarem em constante actualização, existem situações complexas não contempladas. É o caso do estudo do comportamento de estruturas de geometria atípica [20], ou o estudo do comportamento de escombros em tempestades [13]. O conceito de Database Assisted Design [17] (que consiste numa base de dados onde se encontram armazenados dados colhidos de ensaios experimentais em edifícios de diferentes características, publicados por laboratórios de todo o mundo) pode ser uma resposta às limitações dos códigos actuais.

O recurso a programas informáticos de simulação teve também, nas últimas décadas, uma grande evolução. No entanto, estes programas são ainda limitados tanto a nível de software como de hardware, sendo inadequados para o estudo de algumas estruturas ou situações

mais complexas (como é o caso da acção de ventos ciclónicos, ver [28]). De facto, a definição computacional do comportamento do vento enquanto fluido e das condições de fronteira impostas pelas estruturas a estudar, ainda não satisfazem as necessidades da aplicação prática em estruturas correntes de Engenharia Civil.

Como podemos ver na ilustração 2.8, o modelo computacional apresentado está longe do comportamento real de um fluxo de ar incidente num corpo rectangular. Os resultados que conhecemos, tirados de experimentação em modelos reduzidos, permitem-nos identificar as particularidades nas quais o modelo computacional falha, de assinalar: a ausência do vórtice no pé da fachada a sotavento, ausência de estagnação no topo do obstáculo e de vórtice de recuo do fluxo na fachada a barlavento (características que se podem ver na ilustração 2.9). Assim, é-nos possível saber quais as zonas do modelo computacional que exigem maior detalhe (malha mais refinada) ou o recurso a ferramentas matemáticas mais complexas.

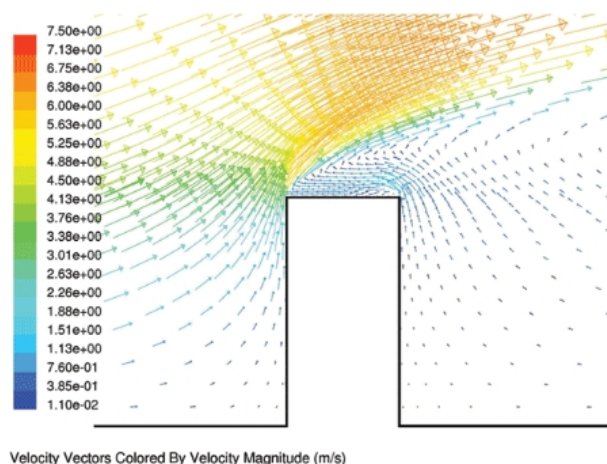


Ilustração 2.8 - Modelo CFD (fonte: <http://www.renewableenergyworld.com>)

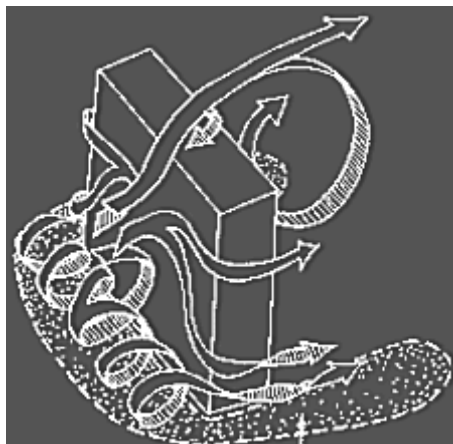


Ilustração 2.9 - Esquema baseado em ensaios em túnel de vento (fonte: <http://arch.ced.berkeley.edu/kap/gallery/gal023.html>)

Deste modo, a modelação física continua a ser uma ferramenta de enorme importância e está em contínua evolução. Na actualidade, procura-se simular a acção de ventos ciclónicos com a criação de simuladores de furacões e tempestades (embora com outros fins).



Ilustração 2.10 - Simulador de furacões da Universidade da Florida (fonte: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/7441481.stm>)

2.3 - Acção do vento: O caso particular das edificações baixas e dos pavilhões industriais

O vento no planeta Terra consiste (veja-se [32] e [49]) no movimento de grandes volumes de ar. A deslocação de massas de ar deve-se, simplificada, a dois factores: O primeiro consiste no fluxo de ar imposto pela diferença de pressão entre os centros de alta e baixa

pressão, que por sua vez têm origem nas diferentes temperaturas que ocorrem nos pólos do globo (baixas temperaturas) e no equador (temperaturas mais altas); o segundo consiste nas forças resultantes do efeito de Coriolis, ou seja, as forças geradas pela própria rotação do planeta (este assunto é explicado em detalhe em [32] e [37]).

A acção do vento consiste numa acção dinâmica. Para efeitos de dimensionamento, a acção do vento pode ser descrita pelo valor da sua pressão dinâmica correspondente, a partir da qual é possível determinar o carregamento sobre os elementos da estrutura.

A complexidade de um carregamento dinâmico aleatório como o vento, leva a que no dimensionamento de estruturas se proceda à simplificação de tratar a acção do vento como um carregamento quase-estático, ou seja, recorrer a um conjunto de carregamentos estáticos equivalentes para estudar o seu efeito sobre a estrutura (veja-se [44], [41] e [38]).

Considerando o ar como um fluido incompressível (uma vez que as pressões envolvidas produzem uma compressão insignificante do ar) e de massa volúmica, ρ , e um escoamento uniformes e num sistema isotérmico, a sua pressão dinâmica, q , é dada por,

$$q = \frac{1}{2} * \rho * U^2 \quad (2.1)$$

em que U é a velocidade do vento.

No estudo da acção das pressões devidas ao vento, actuates numa edificação, definem-se coeficientes de forma ou coeficientes de pressão. Os coeficientes de pressão podem ser pontuais, médios ou integrados permitindo, estes últimos (coeficientes de forma, se respeitantes a todo o corpo), o cálculo directo de esforços em função da pressão dinâmica do vento. Na metodologia seguida neste trabalho, interessam os coeficientes de pressão locais e médios, que quando multiplicados pela pressão dinâmica do vento resultam na pressão efectiva actuante no ponto (locais) ou zona (médios) a que dizem respeito. A determinação destes coeficientes de pressão será abordada na secção 4.4 do Capítulo 4, a propósito do tratamento dos dados fornecidos pela experimentação em túnel de vento. O

valor das acções é obtido directamente multiplicando os valores das pressões pelas suas áreas de influência.

A acção do vento em edificações baixas apresenta algumas características dignas de atenção, em especial quando se verifica o desenvolvimento da edificação numa direcção em particular. Nesses casos é de fundamental importância o estudo da resultante dos coeficientes de pressão interna e externa, com particular atenção ao seu valor na cobertura da estrutura (ver [8] e [44]). A prática comum de inclusão de paredes de alvenaria entre pilares de pórticos consecutivos providencia contraventamento adequado na direcção perpendicular aos mesmos. Por este motivo, a situação de colapso por cedência dos pilares devido à flexão resultante da acção perpendicular ao plano do pórtico não é aqui considerada (a rigidez dos pilares foi estabelecida, como se verá, tendo isto em conta).

No estudo da cedência de coberturas é frequente a análise de diferentes incidências de vento (veja-se [11]), especialmente em estruturas dotadas de assimetria geométrica ou de aberturas não uniformemente distribuídas.

Como se pode ver na ilustração 2.3, é comum que o vector das pressões internas tenha o mesmo sentido e direcção do vector de pressão externa (casos de sucção na envolvente) na cobertura e na parede de fundo. Acontece que os valores de sucção verificados na fachada a barlavento são pequenos quando comparados com os que actuam no topo do edifício.

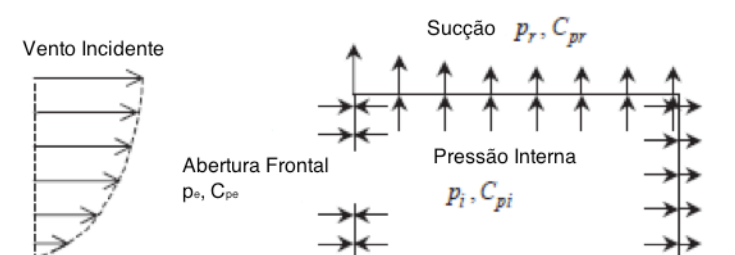


Ilustração 2.11 - Convenção de direcções e sinais para a pressão interna e externa num edifício sujeito à acção do vento (fonte: [4])

Como consequência, em pavilhões industriais sujeitos a ventos fortes, a cobertura e os elementos estruturais que lhe servem de suporte acabam muitas vezes por ceder devido aos esforços actuantes. O problema reside num projecto estrutural deficiente na medida que, por vezes, o dimensionamento falha na relação entre o peso próprio da estrutura e a sustentação da mesma (admite-se que as fundações cumpram os critérios de dimensionamento, ainda que muitas vezes se verifiquem, também para estas, falhas claras do mesmo).

Actualmente, existem algumas soluções que podem evitar a sucção na cobertura, como a implementação de parapeitos em torno da cobertura. No entanto, este tipo de solução é muito dispendioso, devido ao material necessário à sua construção.

As pressões internas são controladas pelos processos de ventilação. O tema é abordado no ponto 2.5 deste capítulo.



Ilustração 2.12 - Cobertura de pavilhão industrial destruída pela acção do vento (fonte: <http://roof-contractor.org>)

2.4 – O conceito de fusível aplicado à estrutura em estudo

O Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa [42] define fusível da seguinte forma:

“Fio de chumbo ou de alguma liga fundível que, colocado num circuito eléctrico, se funde, cortando a corrente quando a intensidade desta atinge certo limite.”

O fusível utilizado em sistemas eléctricos tem a função de dispositivo de segurança que, quando incluído num circuito, garante que a intensidade de corrente não chega a valores passíveis de danificar os restantes elementos do sistema. É esta função que, neste trabalho, se transporta para as estruturas de pavilhões industriais. Pretende-se criar um elemento fusível que, conforme o seu mecanismo, seja despoletado (em função da carga nele aplicada ou em função das condições de incidência e velocidade do vento) com o fim de aliviar o carregamento nos restantes elementos do sistema estrutural.

A cada tipo de acção à qual a estrutura está sujeita está associado um elemento ou um conjunto restrito de elementos que são os primeiros a ceder quando o carregamento atinge um certo valor. Estes elementos, que aqui se designam por elementos críticos, são candidatos à função de elemento fusível, uma vez que representam o elemento mais fraco do sistema (como já foi referido, no caso dos pavilhões industriais os elementos de cobertura são críticos). Neste caso, a abertura do fusível consiste na cedência de uma chapa de cobertura, o que origina uma nova abertura na envolvente e, consequentemente, novas condições de ventilação que vão diminuir a pressão interna na estrutura.

Por outro lado, a grande maioria dos pavilhões industriais de construção recente e aqueles que sejam dimensionados doravante, têm que respeitar o estabelecido no RSCIE (Regulamento de Segurança Contra Incêndio em Edifícios) cuja portaria (1532/2008) entrou em vigor a Janeiro de 2009. Consta do regulamento a inclusão de exaustores na cobertura de edifícios industriais de grande vão. Este tipo de dispositivo permite também o controlo da ventilação. Por hipótese, o dispositivo pode ser alterado de forma que sirva o seu propósito original (exaustão em caso de incêndio) e ainda o propósito de fusível estrutural, bastando

para tal que esteja associado a um sistema de leitura de velocidade e direcção do vento. Para valores críticos destas variáveis, o exaustor abre (o que corresponde à activação do fusível) promovendo a ventilação do edifício.

A vantagem do fusível em relação às soluções clássicas já referidas, reside no facto de a sua montagem e funcionamento serem menos dispendiosos. Isto porque, caso o fusível seja accionado, as soluções acima descritas envolvem apenas reposição de uma chapa de cobertura ou, no caso dos sistemas de exaustão, a reposição do mecanismo.

2.5 - Ventilação natural

A ventilação de um edifício pode ser classificada de três formas: ventilação natural, ventilação forçada e ventilação mista [35]. Para o presente trabalho interessa apenas discutir a ventilação natural, uma vez que é nas suas características que se baseia o mecanismo de optimização estrutural em estudo e nos procedimentos de cálculo a ela associados.

A ventilação natural consiste no movimento natural do ar, actuado por forças naturais que têm a sua origem em correntes de convecção térmica ou na acção do vento [23].

As correntes de convecção térmica traduzem-se no chamado efeito de chaminé, que consiste na subida do ar quente (por norma, numa edificação é o ar mais saturado, contendo toxinas) e na descida do ar frio. Esta troca, associada à permeabilidade da edificação e à existência de aberturas na sua envolvente, a cotas diferentes, permite a renovação do ar por processos naturais.

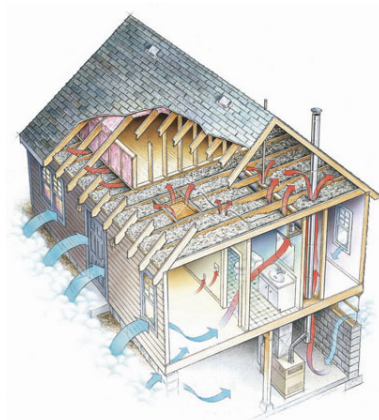


Ilustração 2.13 - Direcções de convecção de ar quente e ar frio numa habitação tipo (fonte: http://www.ncgoesgreen.com/images/convection_house_illustration.jpg)

Por outro lado, como referido anteriormente, a acção do vento produz diferentes distribuições de pressões, conforme a direcção do vento incidente sobre a edificação. A orientação das aberturas, associada ao diferencial entre as pressões actuantes nas mesmas, produz um fluxo de ar no interior cuja direcção é determinada pela resultante das pressões envolvidas. No presente estudo este fenómeno é determinante, não só porque as aberturas são a variável que se pode controlar (por intermédio da activação de um fusível) mas também porque, como consequência do fluxo de ar por acção do vento, a pressão interna sofre alterações em função da área e localização das aberturas envolvidas no processo de ventilação (veja-se [22] e [36]).

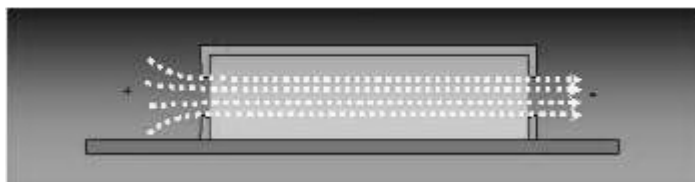


Ilustração 2.14 - Esquema simplificado de ventilação natural com abertura a barlavento e a sotavento. (fonte: <http://www.nordesteural.com.br>)

Capítulo 3 – Fundamentos Teóricos

3.1 - Coeficientes de pressão devidos à acção do vento em estruturas de baixa elevação de acordo com o EC

Os coeficientes de pressão são valores adimensionais que, no estudo da acção do vento em edifícios, permitem descrever a distribuição de pressões relativas no edifício. A vantagem da sua utilização vem da modelação física, dado que o valor dos coeficientes é igual em protótipo e modelo uma vez que é adimensional e não está sujeito à aplicação de escalas.

A norma Europeia EN 1991-1-4 define procedimentos para o cálculo de acções devidas ao vento [1]. Com base na formulação exposta neste documento, a força actuante no exterior do edifício, gerada pela acção do vento é dada por,

$$F_{w,e} = C_s C_d * \sum_{superficies} (w_e * A_{ref}) \quad (3.1)$$

Assim como a força actuante no interior do edifício é dada por,

$$F_{w,i} = \sum_{superficies} (w_i * A_{ref}) \quad (3.2)$$

Sendo que,

- $C_s C_d$ é o factor estrutural que, para estruturas de baixa elevação (altura inferior a 15 metros), pode ser considerado unitário. Esta consideração implica que neste tipo de edificação, eventuais respostas dinâmicas induzidas pelo vento são pouco significativas e que a acção do vento pode pois ser avaliada de um ponto de vista quase-estático;
- A_{ref} é a área sobre a qual incide a força distribuída w_e ou w_i ;
- w_e e w_i são as cargas distribuídas, resultantes da acção do vento que actuam no exterior e no interior da edificação, respectivamente. Estas cargas são dadas por:

$$w_e = q_p(z_e) * c_{pe} \quad (3.3)$$

e

$$w_i = q_p(z_i) * c_{pi} \quad (3.4)$$

Sendo que:

- q_p é a pressão dinâmica à velocidade dita de pico para uma dada altura de referência;
- z_e é a altura de referência para pressões externas e z_i é a altura de referência para pressões internas. Para edificações baixas, a altura de referência é igual para pressões externas e internas;
- c_{pe} é o coeficiente de pressão externa;
- c_{pi} é o coeficiente de pressão interna;

Quanto à pressão à velocidade de pico, para uma altura total de edificação (z) maior ou igual ao valor de z_{min} , dado pela tabela:

Categoria de terreno		z_0 m	z_{min} m
0	Zona marítima ou costeira exposta ao mar aberto	0,003	1
I	Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação desprezável e sem obstáculos	0,01	1
II	Zona de vegetação rasteira como erva e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações de, pelo menos, 20 alturas de obstáculos	0,05	2
III	Zona regularmente coberta de vegetação ou de edifícios ou com obstáculos isolados com separações de, no máximo, 20 alturas de obstáculos (como aldeias, terreno suburbano, floresta permanente)	0,3	5
IV	Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta de edifícios cuja altura média é superior a 15 m	1,0	10
NOTA: As categorias de terrenos estão representadas em A.1.			

Tabela 3.1 - Valores de z_0 e z_{min} a considerar, em função da categoria do terreno. (fonte: [26])

é dada por [27]:

$$q_p(z) = \left[1 + \frac{7}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right] * \frac{1}{2} * \rho * v_m(z)^2 \quad (3.5)$$

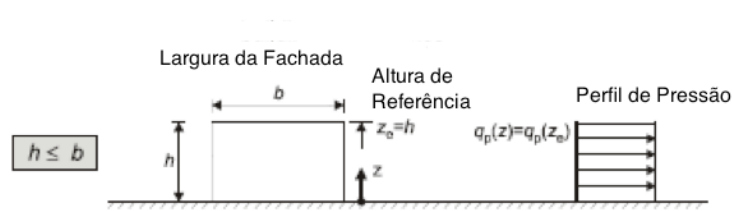


Ilustração 3.1 - Perfil de velocidade a considerar. (fonte: [26])

Sendo que,

- ρ é a massa volúmica do ar;
- $v_m(z)$ é a velocidade média do vento à altura z , dada por,

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b \quad (3.6)$$

Em que,

- $C_r(z)$ é o factor de rugosidade, que para edificações de altura total (z) entre z_{\min} e 200 metros é dado por,

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3.7)$$

$$\text{para, } k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (3.8)$$

- $C_0(z)$ é o factor de orografia, cujo valor recomendado é 1,0;
- v_b é a velocidade básica do vento, definida como função da direcção do vento e altura do ano,

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} \quad (3.9)$$

- c_{dir} é o factor de direcção, de valor recomendado 1,0;
- c_{season} é o factor que traduz a época do ano, de valor recomendado 1,0;
- $v_{b,0}$ é o valor fundamental da velocidade básica do vento, cujo valor é dado no anexo nacional.

Note-se que a expressão 3.5 se baseia na lei logaritmica de camada limite, ao passo que a formulação do RSAEEP (Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes) usava uma lei de potência. A nova formulação faz mais sentido uma vez que, como pode ser demonstrado teoricamente, o perfil de dissipação de energia na camada limite é logaritmico.



Ilustração 3.2 - Velocidade fundamental do vento. Valores a considerar no espaço Europeu (fonte: [26])

Conhecido o valor da pressão à velocidade de pico, há que conhecer ou determinar os coeficientes de pressão no edifício, cujo valor depende das características geométricas do mesmo e da direcção do vento. O código estabelece a seguinte convenção de sinais:

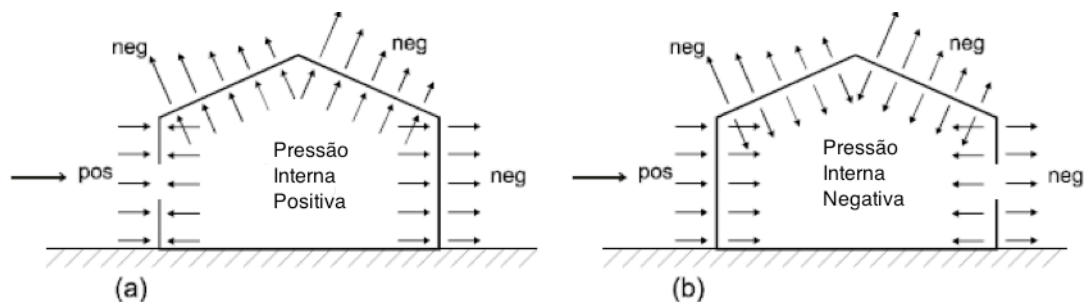


Ilustração 3.3 - Convenção de sinais de pressão interna e externa (fonte: [26])

E fornece também, uma simplificação da distribuição dos coeficientes de pressão externa com recurso a mapas de zonamento da superfície do edifício. Para o pavilhão industrial em estudo interessam-nos mapas da Ilustração 3.4, referentes aos coeficientes de pressão externa em paredes:

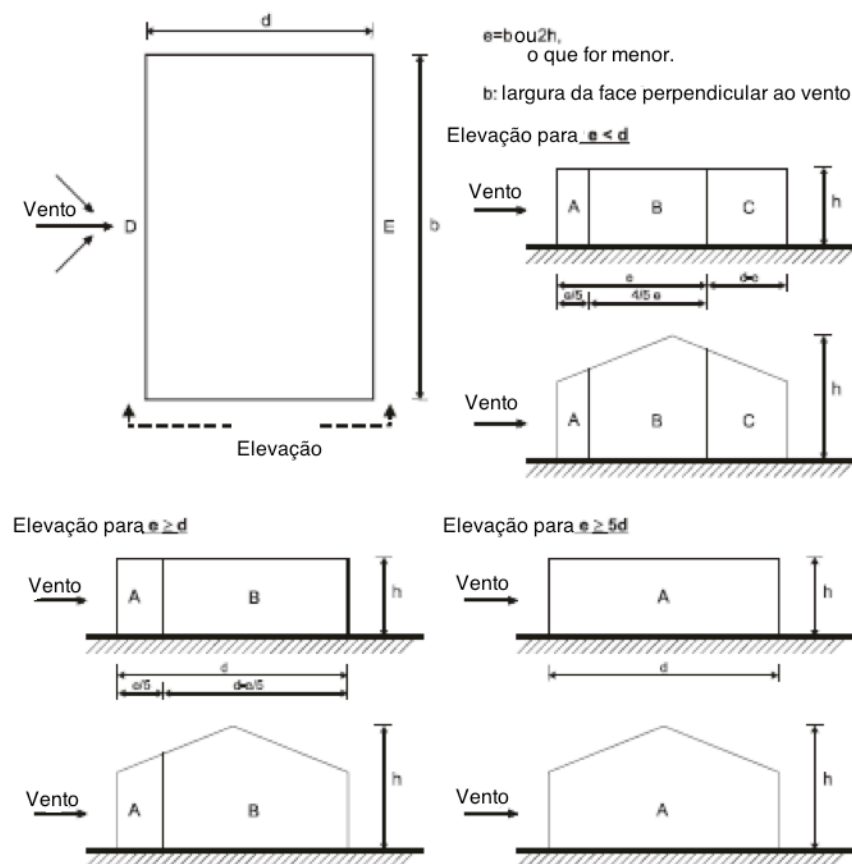


Ilustração 3.4 - Zonamento de paredes em função das dimensões do edifício e da incidência do vento. (fonte: [26])

Zona	A		B		C		D		E	
h/d	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\square 0,2$ 5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Tabela 3.2- Coeficientes de pressão externa em paramentos verticais (fonte: [26])

E as Ilustrações 3.5 e 3.6 para coberturas de duas águas:

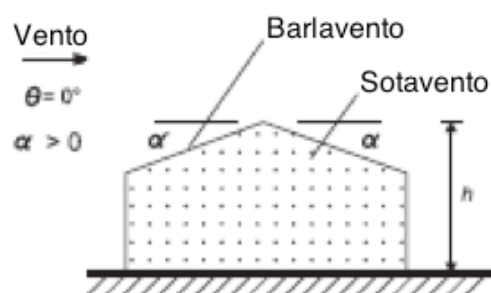
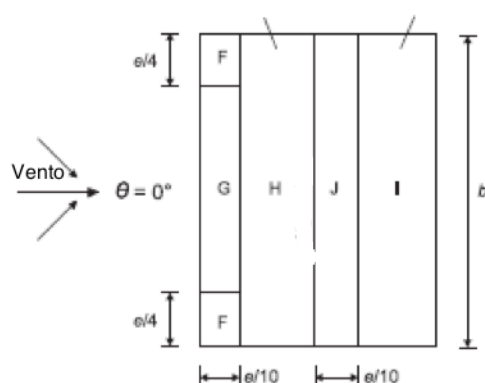


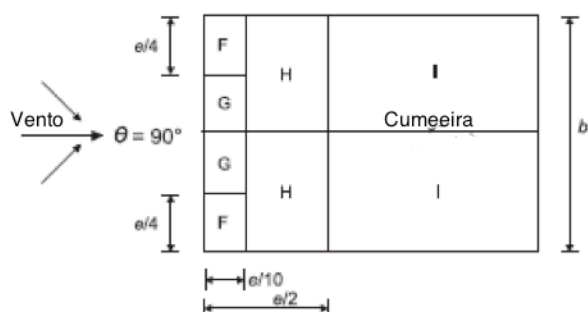
Ilustração 3.5 - Convenção de sinais para a inclinação da cobertura (fonte: [26])



(b) Incidência a $\theta = 0^\circ$

$e = b$ or $2h$
o que for menor.

b : Largura da face perpendicular ao vento.



(c) Incidência a $\theta = 90^\circ$

Ilustração 3.6 - Zonamento da cobertura em função das suas dimensões e da incidência do vento. (fonte: [26])

Ângulo de inclinação α	Zona para a direcção do vento $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	Cpe,10	Cpe,1	Cpe,10	Cpe,1	Cpe,10	Cpe,1	Cpe,10	Cpe,1	Cpe,10	Cpe,1
-45°	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2		+0,2	
							-0,6		-0,6	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6		+0,2	
	+0,0		+0,0		+0,0				-0,6	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4		-1,0	-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2		+0,0		+0,0	+0,0
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,5	
	+0,7		+0,7		+0,4		+0,0		+0,0	
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,2		-0,3	
	+0,7		+0,7		+0,6		+0,0		+0,0	
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,2		-0,3	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,2		-0,3	

Tabela 3.3 - Coeficientes de pressão externa em coberturas. (fonte: [26])

Quanto à pressão interior, vai-se simplificadamente considerar que é dada por [26],

$$c_{pi} = 0,90 * c_{pe} \quad (3.10)$$

Em que c_{pe} é o coeficiente de pressão externa na zona da abertura. Esta simplificação é recomendada pelo EC quando a área das aberturas a barlavento é maior ou igual ao triplo das restantes aberturas. No caso de existirem múltiplas aberturas, a formulação do EC estima o coeficiente de pressão interna em função do rácio entre a área total das aberturas sujeitas a coeficientes de pressão externa de valor negativo pela área total das aberturas, independentemente do valor dos coeficientes de pressão actuantes nessas áreas. Esta aproximação é, como se verá, pouco exacta quando comparada com o método baseado em processos de ventilação desenvolvido no ponto 3.3 deste capítulo, que provam que o posicionamento das aberturas, as suas áreas, e o coeficiente de pressão externa que nelas actua tem um peso considerável no valor do coeficiente de pressão interna.

3.2 - Coeficientes de pressão em estruturas de baixa elevação determinados com recurso a ensaios em túnel de vento

3.2.1 – Teoria da Semelhança

É com base na teoria da semelhança que se dimensionam os modelos reduzidos, assim como as condições dos ensaios a realizar.

Na criação de um modelo físico representativo, é importante garantir a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica, sendo a última a mais restritiva das três.

A semelhança geométrica baseia-se no conceito de factor de escala. Numa semelhança geométrica perfeita, todas as dimensões no modelo são proporcionais (com igual constante de proporcionalidade entre elas) às dimensões no protótipo. Na realidade, uma semelhança geométrica perfeita é difícil de obter uma vez que esta envolve a rugosidade de superfícies,

perfeição de arestas e outros detalhes de reprodução difícil. Na modelação de protótipos de grandes dimensões é comum o recurso a modelos de escala geométrica distorcida, em que se adoptam diferentes constantes de proporcionalidade para diferentes conjuntos de dimensões. Este tipo de solução é utilizado, por exemplo, em modelos de hidráulica costeira ou estuarina ou, no caso de aerodinâmica, em modelos de CLA (Camada Limite Atmosférica) envolvendo grandes dimensões em planta.

A semelhança cinemática consiste na semelhança de movimento. Esta baseia-se na semelhança geométrica associada à semelhança temporal. Para que o movimento no modelo seja semelhante ao do protótipo há que garantir que, para além da escala de dimensões, também existem escalas de tempo proporcionais. A proporcionalidade de intervalos de tempo afecta grandezas que dependem de comprimentos e do tempo, sendo por exemplo, linear no caso da velocidade (m/s) e quadrada na aceleração (m/s^2).

A semelhança dinâmica é a semelhança de forças e quantidades de movimento e estabelece que as forças actuantes em pontos equivalentes em modelo e protótipo estão sujeitas a uma constante de proporcionalidade. As forças envolvidas num escoamento podem ter várias origens como as diferenças de pressão, viscosidade, tensão superficial, elasticidade, inércia e gravidade, entre outras. No estudo da relação destas forças e da sua transposição entre modelo e protótipo, os números adimensionais (de que se apresentam alguns dos mais correntemente utilizados na tabela seguinte) são ferramentas fundamentais.

Grupo adimensional	Nome	Termos comparados
$S_t = \frac{f_t a}{V}$	Número de Strouhal	Aceleração local e convectiva
$\Pi_g = F_r = \frac{V}{\sqrt{ga}}$	Número de Froude	Aceleração convectiva e gravítica
$\Pi_\mu = R_e = \frac{\rho Va}{\mu} = \frac{Va}{\nu}$	Número de Reynolds	Aceleração convectiva e forças de origem viscosa
$\Pi_{\Delta p} = E_u = \frac{\Delta p}{V^2 \rho}$	Número de Euler	Forças de pressão e aceleração convectiva

Tabela 3.4 - Alguns números adimensionais. (fonte: [30])

No caso dos ensaios em túnel de vento, para obtenção de distribuições de pressões na superfície de um corpo rombo, considera-se que o escoamento é isotérmico e estacionário e que o fluido (ar) é incompressível.

Por outro lado, modelo e protótipo estão no mesmo campo gravitacional e o fluido é o mesmo.

Com base nestas premissas pode-se inferir que a conservação de energia é satisfeita e que as forças de gravidade são semelhantes entre modelo e protótipo ocorrendo que as acções gravíticas (energia potencial associada à cota), são compensadas pela componente de pressão atmosférica e, como tal, não são consideradas (a tensão superficial e as forças elásticas são desprezáveis). Resta então estudar a semelhança associada a forças de inércia (quantidade de movimento), forças de pressão e forças de atrito (ou viscosidade), que de acordo com a bibliografia (veja-se [29],[30],[31] e [38]) se traduzem nas semelhanças de Reynolds e Euler.

3.2.2 - Hipótese da camada limite

O deslocamento de um fluido em redor de um corpo, ou de um corpo através de um fluido resulta em forças dinâmicas entre ambos; no caso do escoamento de ar são chamadas de

forças aerodinâmicas. Estas forças são condicionadas pela forma do corpo, pela velocidade relativa entre fluido e corpo e pelas características do fluido (massa, viscosidade e compressibilidade) ([39]) e a sua correcta modelação está associada às condições de semelhança dinâmica.

Como resultado da viscosidade do fluido, as partículas que se deslocam na vizinhança imediata da superfície do corpo tendem a ser afectadas pela mesma. Este fenómeno deve-se a um duplo mecanismo de viscosidade e turbulência, resultando no abrandamento do deslocamento das partículas (a condição de fronteira entre um fluido e uma superfície sólida é normalmente designada por condição de não escorregamento – velocidade nula na superfície).

À camada de transição entre a superfície de velocidade de escoamento nula e a primeira camada de escoamento livre dá-se o nome de camada limite (CL).

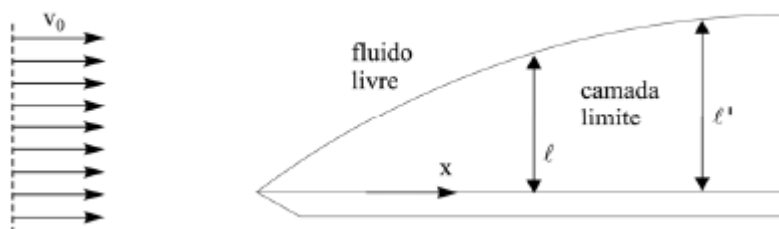


Ilustração 3.7- Esquematisação da separação entre camada limite e escoamento livre. (fonte: [40])

Num ensaio em túnel de vento, o modelo a ensaiar é montado numa placa dotada de um bordo de ataque a barlavento e um bordo de fuga a sotavento. A camada limite apresenta uma variação na sua altura à medida que o escoamento se desloca do bordo de ataque para o bordo de fuga.

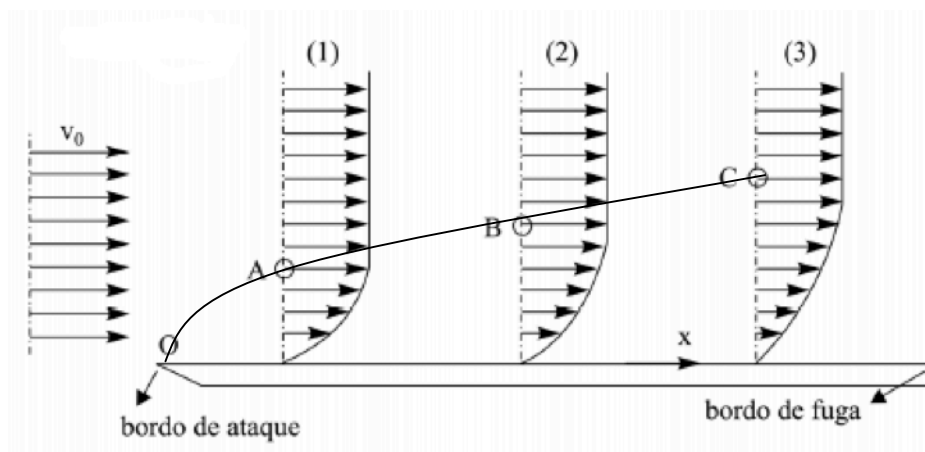


Ilustração 3.8 - Esquemática da variação da espessura da camada limite numa placa de uso comum em ensaios de túnel de vento. (fonte: [40])

A variação nesta altura deve-se ao facto de os efeitos discutidos serem bidimensionais. Consequentemente, a variação de velocidade do escoamento ao longo da placa corresponde também à existência de uma variação numa pequena componente de velocidade perpendicular à placa. Esta componente perturba o fluxo adjacente à placa resultando na variação de altura da camada limite representada.

A altura da perturbação que afecta a camada adjacente à placa está relacionada com o número de Reynolds, ou seja, com as forças de inércia, de viscosidade e, como referido, com a velocidade do escoamento. Para valores muito baixos do número de Reynolds baseados na velocidade exterior, a camada limite apresenta um escoamento laminar, ao passo que para valores elevados apresenta um escoamento turbulento (caso dos ensaios em que se pode constatar que a CL tem alguns (poucos) milímetros de espessura na zona em que se instala o modelo).

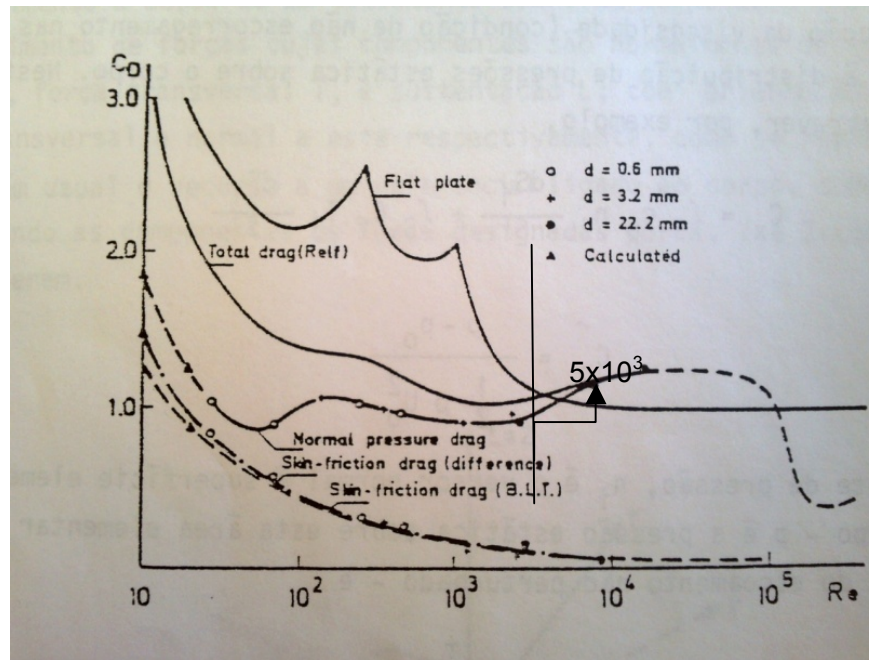


Ilustração 3.9 - Coeficientes de arrastamento para um cilindro e uma placa plana normal ao escoamento, função do número de Reynolds (fonte: [25])

3.2.3 - Teorema de Vaschy-Buckingham ou dos Π 's

O Teorema de Vaschy-Buckingham consiste na formulação matemática da tentativa de estabelecer leis (sob a forma de equações) que regem os fenómenos físicos com base na identificação das variáveis neles envolvidas, um objectivo explícito da análise dimensional que assenta no seguinte:

- Qualquer grandeza física (mecânica), X , pode ser definida com base num máximo de três grandezas fundamentais (ou primárias) independentes, seja no sistema MLT (massa, comprimento e tempo) ou FLT (força comprimento e tempo), por exemplo:

$$[X] = M^\alpha * L^\beta * T^\gamma \quad (3.11)$$

- A grandeza secundária X é dita dimensional se um ou mais expoentes (α , β e γ) forem diferentes de zero, e adimensional se todos forem iguais a zero;
- Conhecidas as unidades de medida da grandeza secundária é possível determinar o valor dos expoentes das grandezas primárias que a definem;

- É possível caracterizar de forma quantitativa um fenómeno físico se for identificado o conjunto de variáveis características, (a_1, a_2, \dots, a_n) suficientes à descrição dos aspectos quantificáveis, A , que o caracterizam:

$$A = f(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (3.12)$$

O propósito da análise dimensional consiste na construção de grandezas adimensionais que modelam diferentes aspectos dos fenómenos físicos e da interacção entre diferentes grandezas envolvidas, tornando-as independentes da sua dimensão física real.

O teorema de Vaschy-Buckingham, também chamado de teorema dos Π 's, é a solução mais conhecida para esse objectivo:

- Admitindo que se conhecem as variáveis características, (a_1, a_2, \dots, a_k) e (b_1, b_2, \dots, b_i) que caracterizam a variável A de um fenómeno físico qualquer, considere-se que (a_1, a_1, \dots, a_k) são dimensionalmente independentes entre si e, como tal, podem ser usadas como variáveis básicas;
- É possível escrever um número n (com $n=k-i$) de parâmetros adimensionais $(\Pi_{b1}, \Pi_{b2}, \dots, \Pi_{bn})$ de acordo com a formulação:

$$\Pi_{bn} = \frac{b_n}{a_1^{x_n} \dots a_k^{z_n}} \quad (3.13)$$

- O conjunto dos parâmetros adimensionais $(\Pi_{b1}, \Pi_{b2}, \dots, \Pi_{bn})$ combinados modela as relações características da função característica do fenómeno físico em estudo:

$$\Pi_A = \varphi(\Pi_{b1}, \Pi_{b2}, \dots, \Pi_{bn}) \quad (3.14)$$

No caso do dimensionamento do modelo que se pretende estudar temos as seguintes variáveis:

- a – dimensão no eixo x ;
- b – dimensão no eixo y ;
- h – dimensão no eixo z ;

- u – velocidade;
- ρ – massa volúmica;
- g – aceleração da gravidade;
- ΔP – variação de pressão;
- μ – viscosidade.

Respectivamente, no sistema MLT:

	a	b	h	u	ρ	g	ΔP	μ
M	0	0	0	0	1	0	1	-1
L	1	1	1	1	-3	1	-1	1
T	0	0	0	-1	0	-2	-2	-1

Tabela 3.5 - Variáveis no sistema MLT

Para que $[a; u; \rho]$ possam ser usadas como variáveis básicas na determinação dos parâmetros adimensionais, estas têm de ser dimensionalmente independentes:

$$\det \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} = 1 \neq 0 \quad (3.15)$$

Então, é possível definir um parâmetro adimensional de pressões (ΔP) em função de $[a; u; \rho]$:

$$\Pi_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{(a^\alpha u^\beta \rho^\gamma)} \leftrightarrow \quad (3.16)$$

$$\leftrightarrow \Pi_{\Delta P} = M^0 * L^0 * T^0 = \frac{(M * L^{-1} * T^{-2})}{L^\alpha * (L * T^{-1})^\beta * (M * L^{-3})^\gamma} \leftrightarrow \quad (3.17)$$

$$\leftrightarrow \begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = 2 \\ \gamma = 1 \end{cases} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \Pi_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{a^0 * u^2 * \rho^1} = \frac{\Delta P}{u^2 * \rho} = Eu \rightarrow \text{Número de Euler} \quad (3.18)$$

De forma análoga, é também possível definir um parâmetro adimensional de viscosidade (μ) em função de $[a; u; \rho]$:

$$\Pi_{\mu} = \frac{\mu}{(a^{\alpha} u^{\beta} \rho^{\gamma})} \leftrightarrow \quad (3.19)$$

$$\leftrightarrow \Pi_{\mu} = M^0 * L^0 * T^0 = \frac{M * L^{-1} * T^{-1}}{L^{\alpha} * (L * T^{-1})^{\beta} * (M * L^{-3})^{\gamma}} \quad (3.20)$$

$$\begin{cases} \alpha = 1 \\ \beta = 1 \\ \gamma = 1 \end{cases} \leftrightarrow \quad (3.21)$$

$$\leftrightarrow \Pi_{\mu} = \frac{\mu}{a^1 * u^1 * \rho^1} = \frac{\mu}{a * u * \rho} = \frac{v}{a * u}; \quad (3.22)$$

$$\text{sendo que } v = \frac{\mu}{\rho} \rightarrow \text{Viscosidade Cinemática} \quad (3.23)$$

Tem-se então,

$$\text{Número de Reynolds} \rightarrow Re = \frac{1}{\Pi_{\mu}} = \frac{a * u}{v} \quad (3.24)$$

No entanto, não é possível satisfazer ambas as semelhanças (Reynolds e Euler) em simultâneo, como se pode ver em seguida.

Para $\lambda_{Eu}=1$ e $\lambda_{Re}=1$, tem-se:

$$\begin{cases} \lambda_{Re} = 1 = \frac{\lambda L * \lambda u}{\lambda v} \\ \lambda_{Eu} = 1 = \frac{\lambda \Delta P}{\lambda u^2 * \lambda \rho} \end{cases} \quad (3.25)$$

Uma vez que, como referido anteriormente, estamos a considerar a incompressibilidade do ar assim como um meio isotérmico, tem-se uma igual massa volúmica e viscosidade em modelo e protótipo:

$$\left[\frac{\rho_{modelo}}{\rho_{prototipo}} \right] = \lambda_{\rho} = 1; \left[\frac{v_{modelo}}{v_{prototipo}} \right] = \lambda_v = 1 \quad (3.26)$$

Sabemos também que a escala da aceleração da gravidade é unitária:

$$\left[\frac{g_{\text{modelo}}}{g_{\text{prototipo}}} \right] = \lambda_g = 1 \quad (3.27)$$

Então,

$$\begin{cases} 1 = \lambda L * \lambda u \\ 1 = \frac{\lambda \Delta P}{\lambda u^2} \end{cases} \quad (3.28)$$

E ainda,

$$\lambda \Delta P = \lambda M * \lambda L^{-1} * \lambda T^{-2} \quad (3.29)$$

$$\lambda \rho = \lambda M * \lambda L^{-3} \rightarrow 1 = \frac{\lambda M}{\lambda L^3} \rightarrow \lambda M = \lambda L^3 \quad (3.30)$$

$$\lambda g = 1 = \lambda L * \lambda T^{-2} \rightarrow \lambda T = \sqrt{\lambda L} \quad (3.31)$$

Ou seja,

$$\lambda \Delta P = \lambda L^3 * \lambda L^{-1} * \sqrt{\lambda L}^{-2} = \lambda L \quad (3.32)$$

Substituindo em (3.24),

$$\begin{cases} \lambda L = \frac{1}{\lambda u} \rightarrow \text{Impossível, C. Q. D.} \\ \lambda L = \lambda u^2 \end{cases} \quad (3.33)$$

obtem-se uma solução impossível para o sistema, uma vez que a igualdade do primeiro ramo é incompatível com a do segundo, isto é, à primeira vista parece impossível levar a cabo a modelação de um protótipo sem que o modelo acabe por ser na realidade o próprio protótipo.

3.2.4 - Os números de Euler e Reynolds nas equações de Navier-Stokes

A análise das equações de Navier-Stokes, que traduzem a variação da quantidade de movimento de fluidos Newtonianos incompressíveis para escoamentos permanentes em função das forças de pressão, forças de atrito e forças de gravidade (ver [50]) conduz a:

$$\overbrace{\rho(\bar{u} * \nabla u)}^{\text{Variação da quantidade de movimento/Forças de inércia}} = \underbrace{-\nabla P}_{\text{Forças de pressão}} + \underbrace{\mu * \nabla^2 \bar{u}}_{\text{Forças de atrito/viscosidade}} - \underbrace{\tilde{g}_i}_{\text{Forças de Gravidade}} \quad (3.34)$$

Como já foi referido, as forças de gravidade são, para o caso, nulas (compensadas pelo gradiente de pressão atmosférica vertical). Para tornar a equação adimensional (ver [32] em “Reynolds Number - Where it comes from”) há que multiplicar todos os termos por $\frac{D}{\rho * V^2}$, em que V é a velocidade média do fluido, D uma dimensão linear característica e ρ a massa volúmica do ar. Considere-se ainda o referido anteriormente:

$$u' = \frac{u}{V}; \frac{\delta}{\delta t'} = \frac{D}{V} \frac{\delta}{\delta t}; \nabla' = D \nabla; \quad (3.35); (3.36); (3.37)$$

Então a equação de Navier-Stokes na sua forma adimensional será,

$$\frac{D}{V^2} = -\nabla P * \frac{D}{\rho * V^2} + \frac{\mu}{\rho * D * V} * \nabla'^2 u' \leftrightarrow \quad (3.38)$$

$$\leftrightarrow \frac{D}{V^2} = - \left(\frac{Eu}{\rho * V^2} \right) + \left(\frac{\frac{1}{Re}}{\frac{v}{D * V}} \right) * \nabla'^2 u' \quad (3.39)$$

Pode-se então concluir, que para valores elevados do número de Reynolds (correspondentes a regimes de escoamento turbulentos), o efeito da viscosidade (quando comparado com o das forças de inércia) tende para zero, o que é compatível com o estabelecido na bibliografia (ver [32], [33] e [25]). A semelhança de Reynolds pode então ser relaxada para escoamentos turbulentos (em modelo e protótipo) no estudo de corpos não fuselados.

É então importante definir um valor crítico para o número de Reynolds, abaixo do qual a semelhança deixa de ser válida. Para corpos rombos como o testado neste trabalho, o valor de Re_{cr} proposto na bibliografia (ver [25] e Ilustração 3.9) é,

$$Re_{cr} \approx 5 * 10^3 \quad (3.40)$$

Pode-se então definir o modelo, com base na semelhança de Euler (facilmente identificável com os coeficientes de pressão). Atendendo que neste estudo, o ensaio serve para a obtenção da distribuição de coeficientes de pressão, a escala geométrica pode ser tão pequena quanto o necessário, assim como a escala de velocidades, desde que o número de Reynolds seja superior a Re_{cr} . Uma vez que os coeficientes de pressão são valores adimensionais, nas condições referidas, os valores no modelo serão semelhantes aos valores encontrados no protótipo.

3.3 - Coeficientes de pressão interna como resultado da ventilação natural

O coeficiente de pressão interna é função dos coeficientes de pressão externa e da relação entre a área e forma das aberturas a barlavento e a área e forma das restantes aberturas. De facto, pode-se recorrer à formulação comum do estudo de fenómenos de ventilação natural para avaliar o efeito da abertura criada pela remoção de uma peça na variação da pressão interna. Como tal, o problema deve ser equacionado em função dessas variáveis.

Considere-se a situação esquematizada, representativa do problema discutido neste trabalho:

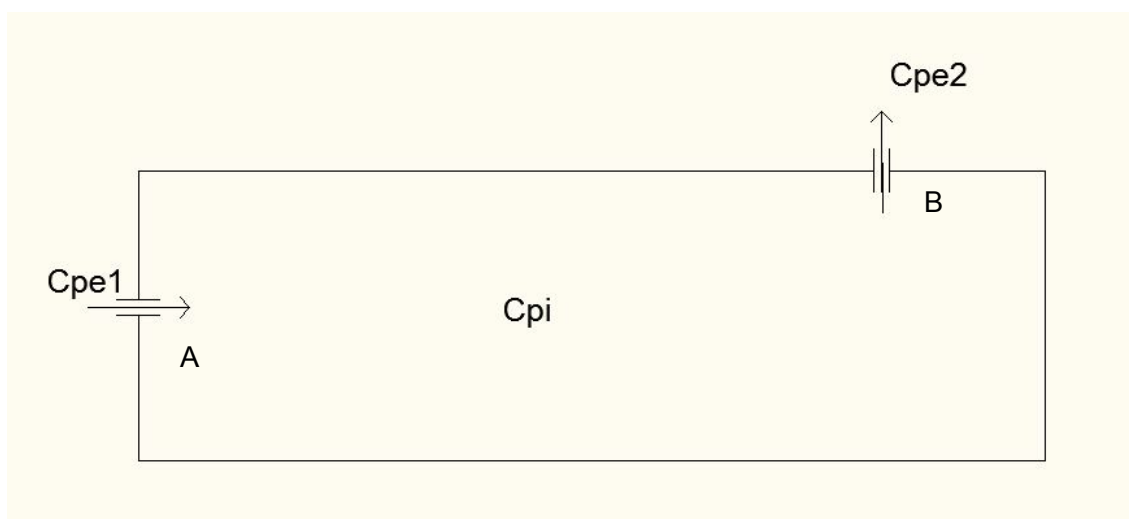


Ilustração 3.10 - Convenção de direcções de escoamento da ventilação natural.

em que A representa a entrada (o portão do pavilhão industrial por exemplo), localizado na face a barlavento, e a saída, B, representa o fusível de área e localização a definir.

Sabe-se que,

$$\Delta C_p = (C_{pe1} - C_{pe2}) = \overbrace{(C_{pe1} - C_{pi})}^{\Delta C_{p_entrada}} - \overbrace{(C_{pe2} - C_{pi})}^{\Delta C_{p_saída}} \quad (3.41)$$

pelo que é possível definir o diferencial de pressão que promove o escoamento (entre a entrada e a saída), simplesmente multiplicando esse diferencial pela pressão dinâmica do vento:

$$\begin{cases} \Delta P_{entrada} = (C_{pe1} - C_{pi}) * \frac{1}{2} * \rho * U^2 \\ \Delta P_{saída} = (C_{pi} - C_{pe2}) * \frac{1}{2} * \rho * U^2 \end{cases} \quad (3.42)$$

Por outro lado, sabe-se que a perda de pressão sofrida por um escoamento depende da velocidade do escoamento e da geometria do percurso, desde a entrada até à saída. De acordo com a bibliografia (ver [35]), os coeficientes de perda de pressão devem ser, para aberturas rectangulares de largura aproximadamente igual ao dobro da altura e para aberturas aproximadamente quadradas:

$$\xi_{\frac{1}{2}} \approx 2; \xi_{quad} \approx 1,5 \quad (3.43); (3.44)$$

Sendo que no nosso caso, a perda de pressão é dada por:

$$\begin{cases} \Delta P_{entrada} = \xi_{entrada} * \frac{1}{2} * \rho * U_{entrada}^2 \\ \Delta P_{saída} = \xi_{saída} * \frac{1}{2} * \rho * U_{saída}^2 \end{cases} \quad (3.45)$$

Se se considerar que as perdas do escoamento no interior do pavilhão são pequenas (a grande dimensão da sua secção face à das aberturas significa velocidades reduzidas e perdas de carga ainda mais reduzidas já que são proporcionais ao quadrado das velocidades).

Conclui-se então que,

$$\begin{cases} \xi_{entrada} * \frac{1}{2} * \rho * U_{entrada}^2 = (C_{pe1} - C_{pi}) * \frac{1}{2} * \rho * U^2 \\ \xi_{saída} * \frac{1}{2} * \rho * U_{saída}^2 = (C_{pi} - C_{pe2}) * \frac{1}{2} * \rho * U^2 \end{cases} \leftrightarrow \quad (3.46)$$

$$\leftrightarrow \begin{cases} \xi_{entrada} * U_{entrada}^2 = (C_{pe1} - C_{pi}) * U^2 \\ \xi_{saída} * U_{saída}^2 = (C_{pi} - C_{pe2}) * U^2 \end{cases} \quad (3.47)$$

Os coeficientes de perda de carga como a velocidade do vento e os coeficientes de pressão externa são valores conhecidos pelo que se tem um sistema de duas equações a três incógnitas, a que, para obter uma solução única, é necessário juntar uma equação adicional. Pela equação da continuidade (conservação de massa), sabemos que o caudal de entrada será igual ao caudal de saída (fluxo estacionário):

$$Q_{entrada} = Q_{saída} \leftrightarrow \quad (3.48)$$

$$\leftrightarrow \rho_{entrada} * U_{entrada} * A_{entrada} = \rho_{saída} * U_{saída} * A_{saída} \quad (3.49)$$

$$\text{Considerando o fluxo isotérmico, } \rho_{entrada} = \rho_{saída} = \rho \quad (3.50)$$

$$U_{entrada} * A_{entrada} = U_{saída} * A_{saída} \quad (3.51)$$

Vem por fim,

$$\begin{cases} \xi_{entrada} * U_{entrada}^2 = (C_{pe1} - C_{pi}) * U^2 \\ \xi_{saída} * U_{saída}^2 = (C_{pi} - C_{pe2}) * U^2 \\ U_{entrada} * A_{entrada} = U_{saída} * A_{saída} \end{cases} \quad (3.52)$$

Sistema de três equações a três incógnitas que permite determinar o coeficiente de pressão interna, para além das velocidades de entrada e saída e como tal o valor dos próprios fluxos de ventilação natural.

Capítulo 4 – Cálculos Justificativos

4.1 - Descrição da Estrutura

A estrutura que em seguida se descreve foi desenhada e dimensionada pelo autor com base na observação de um pavilhão industrial existente no LNEC. Procedeu-se ao levantamento de dimensões (distâncias entre pórticos e altura dos mesmos; área das aberturas; comprimento, largura e altura do edifício), secções de perfis utilizados na estrutura, soluções estruturais para contraventamento, materiais utilizados, ligações de perfis metálicos entre si e aos pilares de betão armado, entre outros.

Apresentam-se em seguida algumas imagens colhidas durante essa visita.



Ilustração 4.1 - Vista interior do pavilhão: Trelças e cobertura.



Ilustração 4.2 - Pormenor de ligação na treliça.



Ilustração 4.3 - Vista de pilar e aberturas.

A estrutura desenhada para este estudo consiste num pavilhão industrial dotado de uma nave de 16,00m de largura por 64,00m de comprimento. A altura total do pavilhão é de 6,00m e a cobertura tem duas águas dotadas de uma inclinação de 15°. A altura ao nível do beiral é de 4,00m.

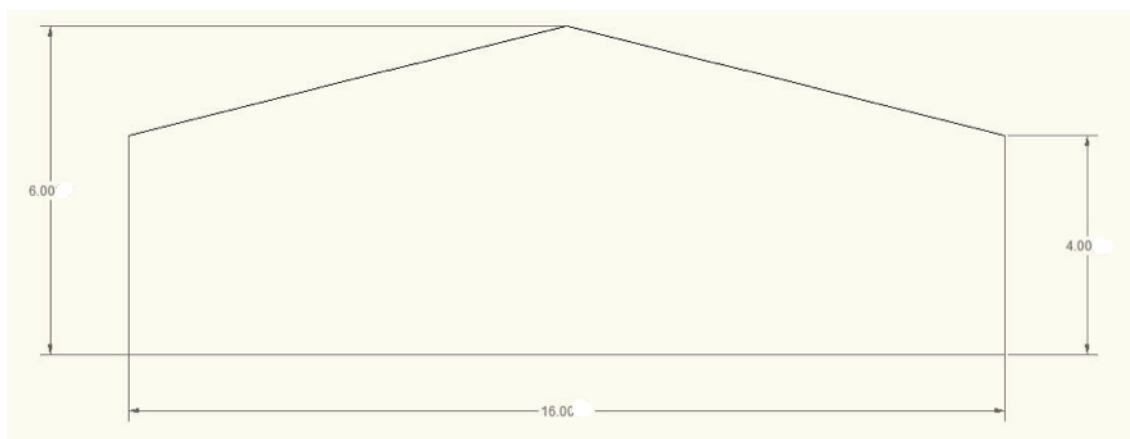


Ilustração 4.4 - Geometria do alçado do edifício

A estrutura, em aço S355, consiste em 11 pórticos espaçados 6,40m entre si. Em cada pórtico, os pilares (perfis HEB200B) suportam um sistema triangulado composto por perfis UNP100 e cantoneiras L 25x25x3 soldadas em +. As madres (perfis IPE180) servem de suporte à cobertura em chapa perfilada P4-4-76-20. Os contraventamentos dos pórticos consistem em tubos de diâmetro 33,7mm. A altura livre entre o solo e a corda mais baixa da treliça é de 2,75m.

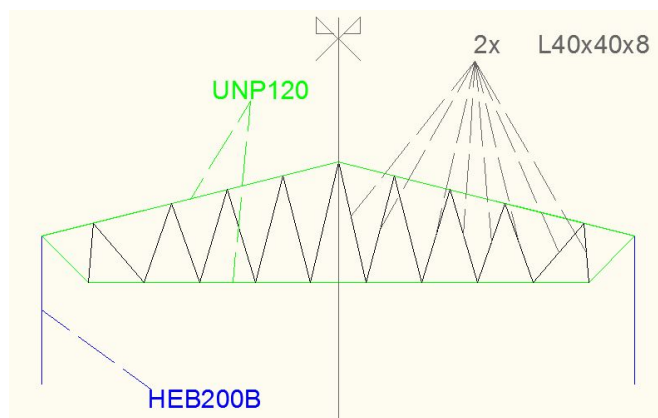


Ilustração 4.5 - Esquematização da estrutura dos pórticos

O aço utilizado apresenta as seguintes características:

Aço S355	
Peso Próprio	76,9729 kN/m ²
Módulo de Young (E)	210 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Tensão característica (σ_y)	355 MPa

Tabela 4.1 - Características do aço S355

As características dos perfis metálicos utilizados podem ser consultadas nas tabelas do Anexo I.

Na estrutura apresentada não foram estudados elementos para travamento longitudinal dos pórticos uma vez que se prevê a construção de paredes de alvenaria entre pilares. Esta solução confere rigidez longitudinal suficiente para prevenir a cedência dos pilares por flexão.

4.2 - Modelo Computacional em SAP2000

A modelação computacional da estrutura teve como base o software de análise estrutural SAP2000 na sua versão 14.0.

Antes da construção do modelo em si, há que definir uma malha de linhas de referência adequadas à construção do mesmo. Para tal, pode ser útil desenhar a estrutura num software que permita facilmente fazer medições, como o Autocad2010 ou SketchUp 7.0. Assim, é possível saber rapidamente qual o espaço entre as linhas de referência e as suas coordenadas.

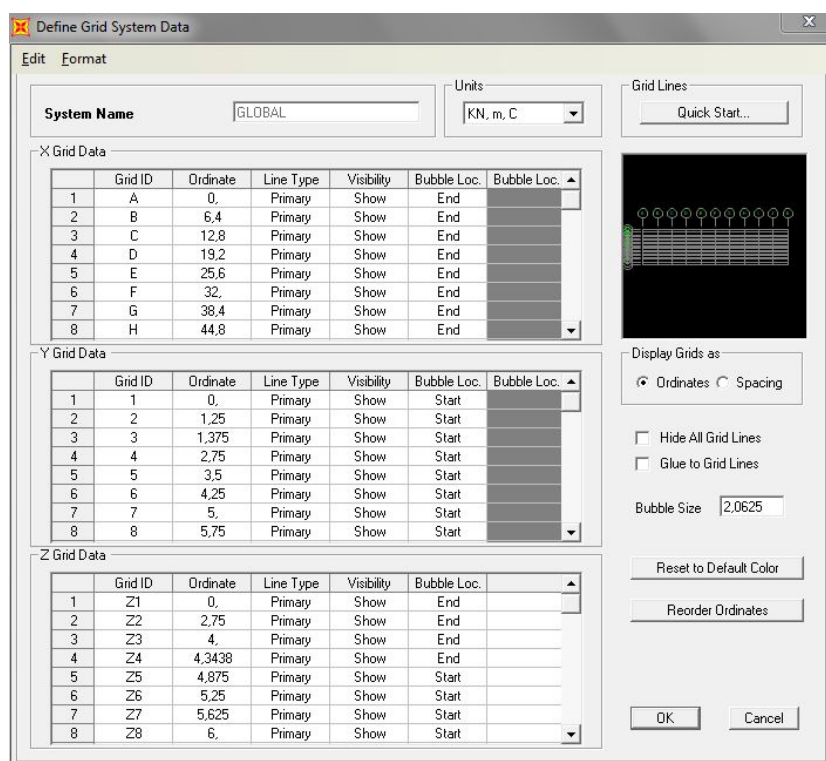


Ilustração 4.6 - Definição da malha de referência

O primeiro passo na construção efectiva do modelo é a definição dos materiais envolvidos. Recorde-se que o edifício, a ser construído, será dotado de paredes de alvenaria e sapatas de betão armado. Uma vez que no modelo só constam os elementos estruturais, o único material a definir é o aço, conferindo-se aos pilares rigidez suficiente para compensar a inexistência de contraventamento longitudinal:

General Data	
Material Name and Display Color	Aco355
Material Type	Steel
Material Notes	Modify/Show Notes...

Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	76.9729
Mass per Unit Volume	7.849

Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	2.100E+08
Poisson's Ratio, U	0.3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1.200E-05
Shear Modulus, G	80769231

Other Properties for Steel Materials	
Minimum Yield Stress, Fy	355000
Minimum Tensile Stress, Fu	510000
Effective Yield Stress, Fye	355000
Effective Tensile Stress, Fue	510000

Ilustração 4.7 - Configuração de materiais

Seguidamente, há que definir as secções dos perfis a utilizar na estrutura. Estas secções são, na fase de dimensionamento, provisórias uma vez que, após a colocação das cargas no modelo, pode-se chegar à conclusão de que as mesmas são inadequadas (por excesso ou por defeito). Como se verá posteriormente, as secções que em seguida se apresentam, são adequadas ao carregamento imposto.

Frame Properties	
Properties Find this property: cruz de 40 HEB2008 IPE200 Tubo33.7 UNP120_BPB UNP120_BPC	Click to: Import New Property... Add New Property... Add Copy of Property... Modify/Show Property... Delete Property
OK Cancel	

Ilustração 4.8 - Configuração dos perfis a utilizar

As características das secções listadas já foram referidas na descrição da mesma, na primeira parte deste capítulo. De referir que algumas secções não existem na predefinição do programa, pelo que terão de ser desenhadas no subprograma “Section Designer” no qual há que ter em atenção a posição do eixo da peça que tem de coincidir com o centro de gravidade da mesma. Apresenta-se em seguida um exemplo da secção composta por duas cantoneiras L40x40x8.

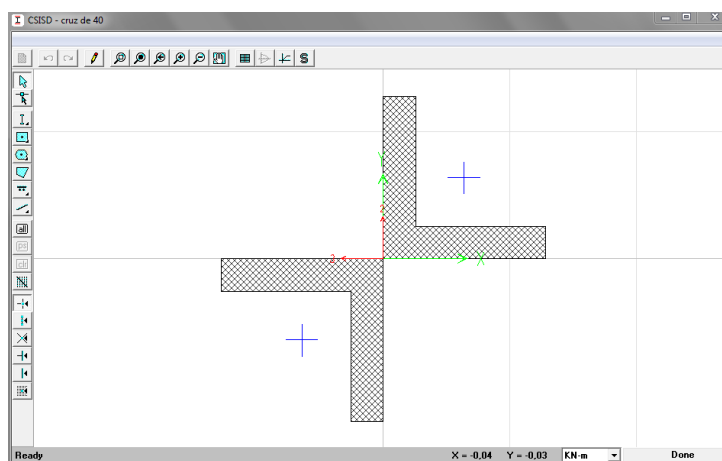


Ilustração 4.9 - Configuração de secções que não constam do catálogo do programa.

Definidos os materiais e as secções, há que dar forma à estrutura.

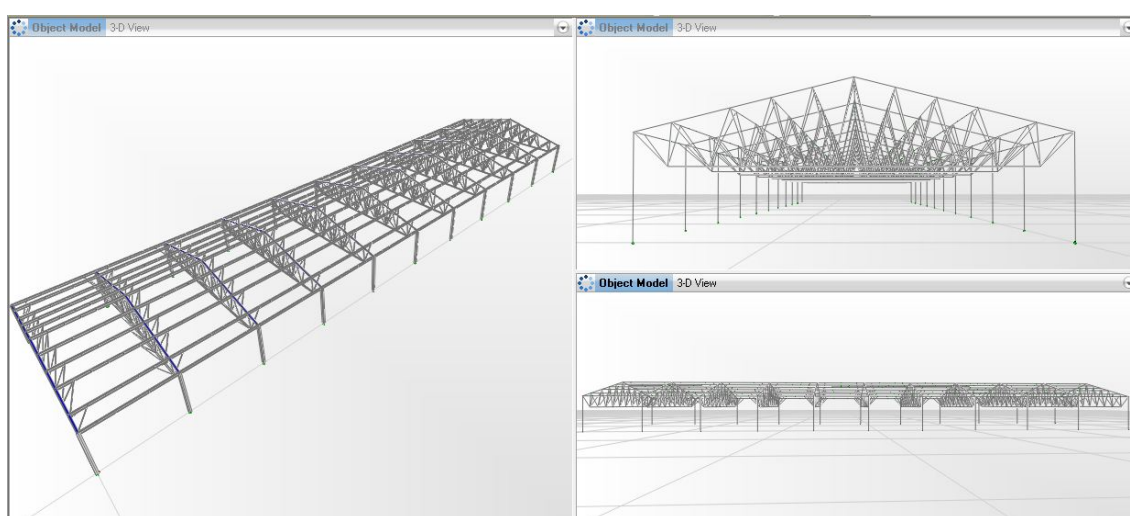


Ilustração 4.10 - Vistas tridimensionais do modelo computacional da estrutura

Por fim, podem ser definidas e aplicadas as cargas envolvidas no estudo. Para este trabalho é necessária a criação de dois ficheiros: o primeiro com o carregamento devido à acção do vento como definido em [26] e verificando a respectiva formulação de segurança para estruturas metálicas como estabelecido em [28]; o segundo com o carregamento obtido como resultado dos ensaios em túnel de vento.

4.3 - Acção do vento em estruturas de baixa elevação de acordo com o Eurocódigo

De acordo com o mapa apresentado na Ilustração 3.2, e tomando para os coeficientes de sazonalidade e de direcção o valor unitário recomendado, tem-se que:

$$v_{b,0} = 27 \text{ m/s} \quad (4.1)$$

$$v_b = 1,0 * 1,0 * 27 = 27 \text{ m/s} \quad (4.2)$$

Para o cálculo da velocidade média do vento, em $z=6\text{m}$, há que determinar o factor de rugosidade, considerando $z_0=0,003$; $z_{0,II}=0,05$, conforme a Tabela 3.1.

$$c_r(6m) = 0,19 * \left(\frac{0,003}{0,05}\right)^{0,07} * \ln\left(\frac{6}{0,003}\right) = 1,186 \quad (4.3)$$

Assumindo para $c_0(z)$ o valor unitário recomendado, tem-se,

$$v_m(6m) = 1,186 * 1,0 * 27 = 32,0 \text{ m/s} \quad (4.4)$$

É então possível determinar o valor da pressão à velocidade de pico,

$$q_p(6m) = \left[1 + \frac{7}{\ln\left(\frac{6}{0,003}\right)}\right] * \frac{1}{2} * 1,25 * 10^{-3} * 32,0 = 1,231 \text{ kPa} \quad (4.5)$$

Resta então determinar os coeficientes de pressão exterior e o coeficiente de pressão interior.

Como estabelecido nos objectivos deste trabalho, pretende-se demonstrar a aplicação da solução proposta e não resolver todas as situações possíveis. Como tal, considere-se que o vento de incidência paralela ao eixo de maior desenvolvimento da edificação é a direcção 0°. É para este azimute que vamos dimensionar o carregamento.

Obtém-se, deste modo, para as faces verticais do edifício,

Valores de $C_{pe,10}$			w_e (kPa)	Área(m ²)	$F_{w,e}$ (kN)
A	-1,2		-1,477	9,6	-14,183
B	-0,8		-0,985	38,4	-37,820
C	-0,5		-0,616	208	-128,037
D	0,7		0,862	63,5	54,723
E	-0,3		-0,369	80	-29,547

Tabela 4.2 - Valores de C_{pe} nos paramentos verticais, de acordo com as Ilustrações 3.4 e 3.6

E para a cobertura tem-se,

						1/2 cobertura		
						$w_e(15^\circ)$ (kPa)	Área (m ²)	$F_{w,e}$ (kN)
$C_{pe,10}$	ZONA	F	G	H	I			
	-15	-1,9	-1,2	-0,8	-0,8	-2,339	3,6	-8,421
	-5	-1,8	-1,2	-0,7	-0,6	-1,477	6	-8,861
	-14	-1,89	-1,2	-0,79	-0,78	-0,985	38,4	-37,820
						-0,985	464	-456,992

Tabela 4.3 - Valores de C_{pe} na cobertura, de acordo com as Tabelas 3.2 e 3.3

Quanto ao coeficiente de pressão interna, considerando que não existem outras aberturas para além da face predominante (na qual a área da abertura é predominante) tem-se:

$$C_{pi} = 0,90 * 0,7 = 0,63 \leftrightarrow (4.6)$$

$$\leftrightarrow w_i = 0,776 \text{ kPa} \leftrightarrow (4.7)$$

$$\leftrightarrow F_{wi} = 1265,79 \text{ kN} \quad (4.8)$$

No caso de a única abertura ser a da face predominante, considere-se:

$$C_{pi} = 0,7 \leftrightarrow (4.9)$$

$$\leftrightarrow w_i = 0,862 \text{ kPa} \leftrightarrow (4.10)$$

$$\leftrightarrow F_{wi} = 1406,433 \text{ kN} \quad (4.11)$$

4.3.1 - Modelo Computacional com acções dimensionadas pelo Eurocodigo

As cargas necessárias à completa definição da acção do vento e peso próprio actuantes na estrutura, de acordo com [1] são as seguintes:

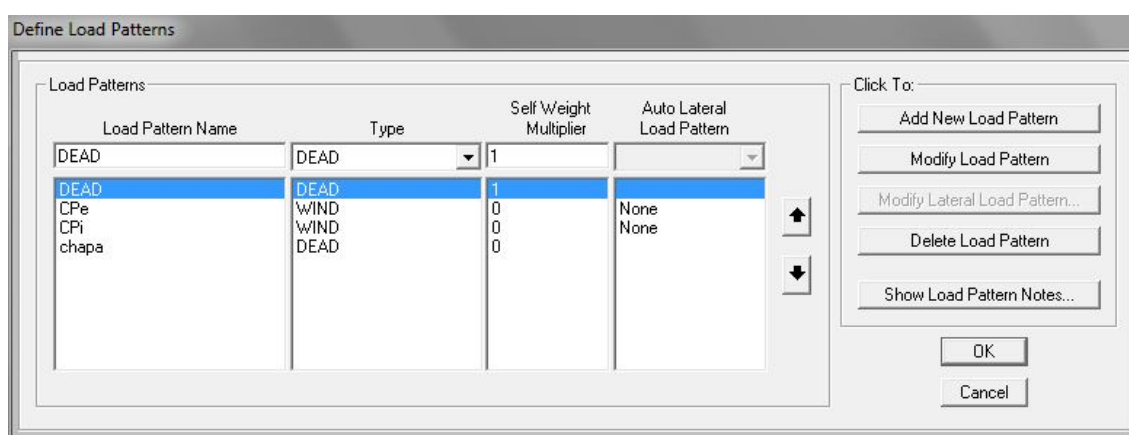


Ilustração 4.11 - Definição dos carregamentos

Note-se que no modelo computacional, o peso das chapas de cobertura é inserido como uma carga (em vez de ser um elemento do modelo). Isto implica que todas as cargas distribuídas (incluindo o peso próprio da cobertura) sejam aplicadas nos elementos nos quais assentariam as chapas de cobertura, numa força de intensidade igual à da carga multiplicada pela área de influência do elemento.

As versões mais recentes do SAP2000 permitem fazer a verificação de estruturas metálicas de acordo com a formulação do EC3. Foi esta ferramenta que permitiu uma rápida verificação da resistência dos elementos estruturais e a correcção de algumas secções menos adequadas. No entanto, há que analisar detalhadamente todas as combinações geradas automaticamente pelo programa, uma vez que algumas poderão não ser aplicáveis ao estudo que se pretende.

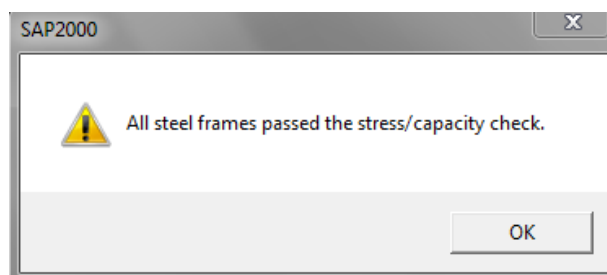


Ilustração 4.12 - Verificação da segurança pelo EC3

4.4 - Coeficientes de pressão determinados por ensaios no túnel de vento

Os ensaios foram realizados no túnel aerodinâmico do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC): um túnel de circuito fechado dotado de uma câmara de experiências de dimensões 1,25x1,00x3,00 m². A sua descrição pormenorizada pode ser consultada na bibliografia em [34].



Ilustração 4.13 - Túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica do LNEC

O modelo ensaiado tem uma área em planta de $32 \times 8 \text{ cm}^2$ com uma altura total de 3cm e uma inclinação da cobertura de 15° . No modelo foram inseridas 74 tomadas de pressão (com 1mm de diâmetro) distribuídas da forma abaixo indicada. A instrumentação do modelo é feita desta forma (assimétrica) porque, ao rodar o modelo dentro do túnel é possível obter leituras para qualquer incidência. Desta forma, a simetria do modelo faz com que leituras em direcções opostas se traduzam em resultados simétricos pelo que se produziriam resultados repetidos caso se distribuíssem as tomadas de forma simétrica. Desta forma, poupa-se na instrumentação do modelo tornando-o mais barato, mais fácil de manusear e de montar no túnel.

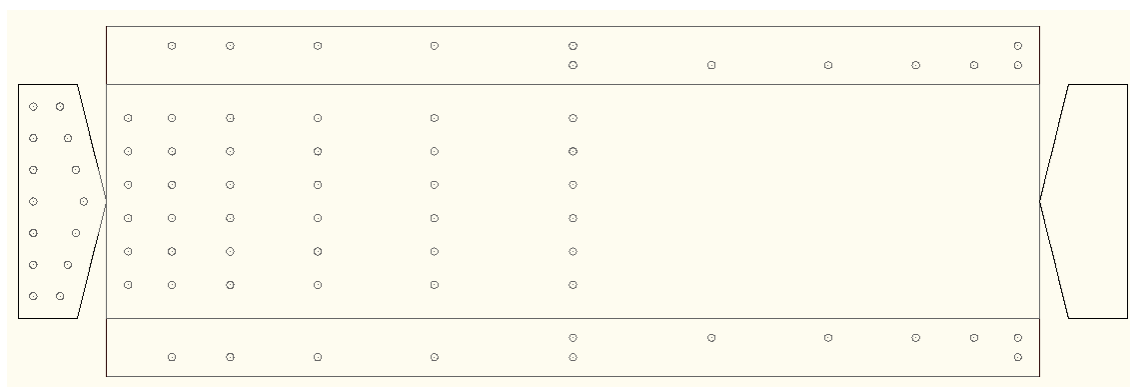


Ilustração 4.14 - Mapa das tomadas de pressão instaladas no modelo

O modelo foi colocado no túnel, solidário a uma placa giratória na qual se marcaram os rumos segundo os quais se pretendia estudar a acção do vento.



Ilustração 4.15 - Modelo fixado na placa giratória, dentro do túnel.

Os pontos de medição foram numerados da seguinte forma:

		145	21	29	37	45	127	53	119		111	103	95	71	
		146	143	141	139	137	128	54	63		65	67	69	72	
1	8														
2	9	15	22	30	38	46	128	55	120		112	104	96	88	82
3	10	16	23	31	39	47	130	56	121		113	105	97	90	83
4	11	17	24	32	40	48	131	57	122		114	106	98	91	84
5	12	18	25	33	41	49	132	58	123		115	107	99	92	85
6	13	19	26	34	42	50	133	59	124		116	108	100	93	86
7	14	20	27	35	43	51	134	60	125		117	109	101	94	87
		147	144	142	140	138	135	61	64		66	68	70	73	
		148	28	36	44	52	136	62	126		118	110	102	74	

Ilustração 4.16 - Numeração dos pontos de leitura.

As tomadas numeradas a preto dizem respeito à medição numa determinada direcção (0°, 30°, 45°, 60° e 90°), ao passo que as numeradas a encarnado dizem respeito à sua complementar (120°, 135°, 150°, 180°).

As tomadas de pressão foram ligadas, por tubos flexíveis de numeração correspondente à tomada a que dizem respeito, a duas células de medição de pressão, cujas agulhas de entrada estão também numeradas. A numeração de todos os instrumentos permite a correspondência exacta entre o mapa apresentado acima e os dados gerados pelos “softwares” de aquisição e tratamento de medidas utilizado.



Ilustração 4.17 - Saída dos tubos, ligados às tomadas de pressão, na parte inferior da placa giratória e para fora do túnel.



Ilustração 4.18 - Células de medição de pressão, com capilares flexíveis para ligação dos tubos.

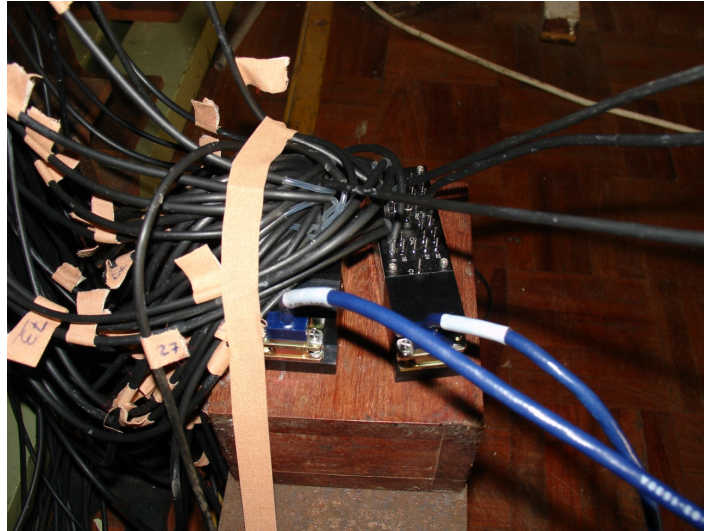


Ilustração 4.19 - Ligação dos tubos flexíveis numerados às células de medição de pressão.

Nas células dão também entrada dois tubos flexíveis, ligados a um tubo de Pitot-Prandtl, que fornece a pressão estática e a pressão total do escoamento não perturbado no túnel (isto é, na zona exterior da pequena camada limite formada) e permite a determinação da pressão dinâmica do escoamento, q , bem como a velocidade (indirectamente $U = \sqrt{\frac{2 \cdot q}{\rho}}$).

Sabendo que,

$$P_{Pitot-Prandtl}^{Total} = P_{Pitot-Prandtl}^{Estática} + \frac{1}{2} * \rho * U^2 \quad (4.12)$$

E que,

$$P_{Pitot-Prandtl}^{Dinâmica} = \frac{1}{2} * \rho * U^2 \quad (4.13)$$



Ilustração 4.20 - Tubo de Pitot-Prandtl

Os coeficientes de pressão são calculados por,

$$C_{p_tomada} = \frac{p_{tomada}^{Estatica} - p_{Pitot-Prandtl}^{Estatica}}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (4.14)$$

Os ensaios foram realizados a uma velocidade de $U=10\text{m/s}$ no túnel de vento. Este valor garante que o número de Reynolds se encontra acima do valor crítico já que,

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu_{ar}} = 10 \cdot \frac{D}{15,11 \cdot 10^{-6}} = D \cdot 6,6 \cdot 10^5 \quad (4.15)$$

Para,

$$Re_{cr} = 5 \cdot 10^3 \rightarrow D_{cr} = \frac{5 \cdot 10^3}{6,6 \cdot 10^5} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{m} = 0,75 \text{cm} \quad (4.16)$$

O valor da dimensão característica do modelo é superior em pelo menos uma ordem de grandeza ao valor crítico, em todas as direcções de incidência de vento consideradas.

$$D_{menor} = \sqrt{A_{face\ menor}} = \sqrt{(8 \cdot 2) + (8 \cdot \frac{1}{2})} = \sqrt{16 + 4} = 4,47 \text{cm} > D_{cr} \quad (4.17)$$

As células traduzem a pressão transmitida pelos tubos flexíveis em impulsos eléctricos que são traduzidos por um módulo electrónico.



Ilustração 4.21 - Módulo de processamento de dados (marca comercial PSI)

O módulo electrónico está, por sua vez, ligado a um computador dotado de software específico para armazenamento da informação captada sob a forma de ficheiro MsExcel.

Neste conjunto de ensaios fizeram-se medições para nove direcções de incidência de vento. Cada ensaio teve uma duração de aproximadamente 1 minuto, com duas leituras de pressão por segundo (processo de média com cerca de 30 amostras por fonte de medida).

Calculados os coeficientes de pressão determinou-se a média temporal para cada tomada e para cada incidência, cruzando a informação de incidências opostas entre si de forma a obter um conjunto de pressões relativo à totalidade da superfície do modelo.

Desta forma obtiveram-se 5 distribuições de pressão (veja-se o Anexo II) dos quais se apresentam em seguida os valores obtidos para uma incidência a 0°:

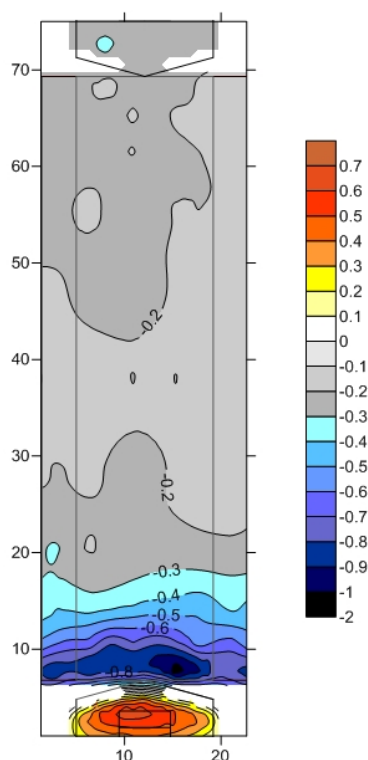
Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe
1	0,239	38	-0,181	75	-0,302	112	-0,164
2	0,331	39	-0,243	76	-0,247	113	-0,228
3	0,346	40	-0,233	77	-0,278	114	-0,211
4	0,397	41	-0,252	78	-0,240	115	-0,224
5	0,373	42	-0,242	79	-0,305	116	-0,192
6	0,294	43	-0,230	80	-0,259	117	-0,201
7	0,160	44	-0,225	81	-0,293	118	-0,199
8	0,365	45	-0,168	82	-0,205	119	-0,172
9	0,555	46	-0,170	83	-0,338	120	-0,227
10	0,649	47	-0,214	84	-0,272	121	-0,229
11	0,566	48	-0,218	85	-0,248	122	-0,205
12	0,538	49	-0,237	86	-0,200	123	-0,244
13	0,494	50	-0,166	87	-0,275	124	-0,164
14	0,386	51	-0,134	88	-0,253	125	-0,139
15	-0,889	52	-0,161	89	-0,204	126	-0,153
16	-0,842	53	-0,205	90	-0,177	127	-0,232
17	-0,850	54	-0,174	91	-0,252	128	-0,192
18	-0,847	55	-0,176	92	-0,203	129	-0,174
19	-1,069	56	-0,182	93	-0,279	130	-0,190
20	-0,930	57	-0,204	94	-0,182	131	-0,215
21	-0,525	58	-0,180	95	-0,274	132	-0,173
22	-0,628	59	-0,206	96	-0,201	133	-0,204
23	-0,811	60	-0,166	97	-0,233	134	-0,147
24	-0,705	61	-0,194	98	-0,188	135	-0,180
25	-0,794	62	-0,124	99	-0,233	136	-0,113
26	-0,724	63	-0,185	100	-0,182	137	-0,214
27	-0,538	64	-0,146	101	-0,189	138	-0,147
28	-0,534	65	-0,242	102	-0,171	139	-0,323
29	-0,305	66	-0,195	103	-0,202	140	-0,216
30	-0,339	67	-0,239	104	-0,220	141	-0,389
31	-0,366	68	-0,186	105	-0,211	142	-0,356
32	-0,399	69	-0,261	106	-0,197	143	-0,590
33	-0,434	70	-0,171	107	-0,228	144	-0,654
34	-0,431	71	-0,264	108	-0,212	145	-0,818
35	-0,485	72	-0,276	109	-0,201	146	-0,882
36	-0,426	73	-0,165	110	-0,191	147	-0,774
37	-0,281	74	-0,190	111	-0,283	148	-0,859

Tabela 4.4 – Cpe's para incidência 0°

4.4.1 - Mapas de linhas isobáricas

O mapa de linhas isobáricas resultantes da acção do vento sobre o pavilhão em estudo, pode ser criado com recurso ao “software” SURFER V9.0 a partir de dados armazenados em formato MsExcel, utilizando apenas ferramentas que constam do programa. O procedimento, passo por passo, para criação dos mapas de isobáricas encontra-se no Anexo III.

Apresenta-se em seguida o mapa obtido para a incidência em estudo (0°). Os restantes mapas encontram-se no Anexo IV.



rotina em Mathematica 7.0, que torna mais rápido o cálculo repetido da pressão interna para várias condições base. O código desenvolvido pode ser consultado na íntegra no Anexo V.

A primeira parte da rotina consiste no “input” das variáveis de cálculo: Área da entrada, dimensões do fusível, coeficientes de pressão externa na entrada e no fusível e velocidade do vento.

Os valores apresentados por defeito dizem respeito à situação considerada neste cálculo, ou seja,

- Incidência de vento paralela à maior dimensão do pavilhão, ou seja, a 0°;
- Área da abertura virada ao vento igual a um terço da área do portão, ou seja, 5,5m² (considerando que o portão começa a abrir e que um terço da abertura é suficiente para a estabilização da pressão interna da ordem de grandeza da definida nos EC's);
- Dimensão do fusível igual a 3 m por 1,064 m (comprimento máximo e largura de cada elemento de cobertura, ou seja, dimensão de uma chapa de cobertura);
- Coeficiente de pressão externa na face a barlavento de 0,6;
- Coeficiente de pressão interna igual ao coeficiente de pressão externa na área da abertura a barlavento;
- Coeficiente de pressão externa na zona do fusível de -0,9 (que para esta direcção, é o maior valor negativo de pressão externa na cobertura);
- Velocidade do vento de 20 m/s.

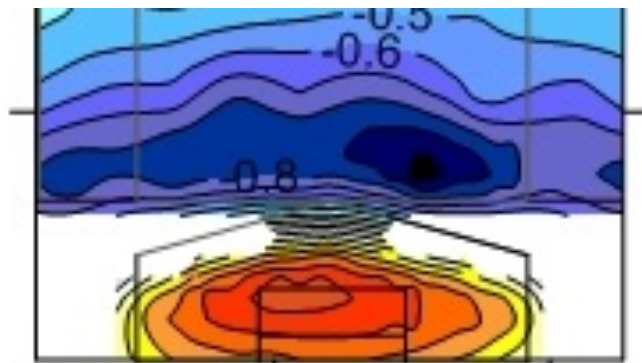


Ilustração 4.23 - Pormenor de Isobáricas a 0°. Valores máximos de sucção na cobertura.

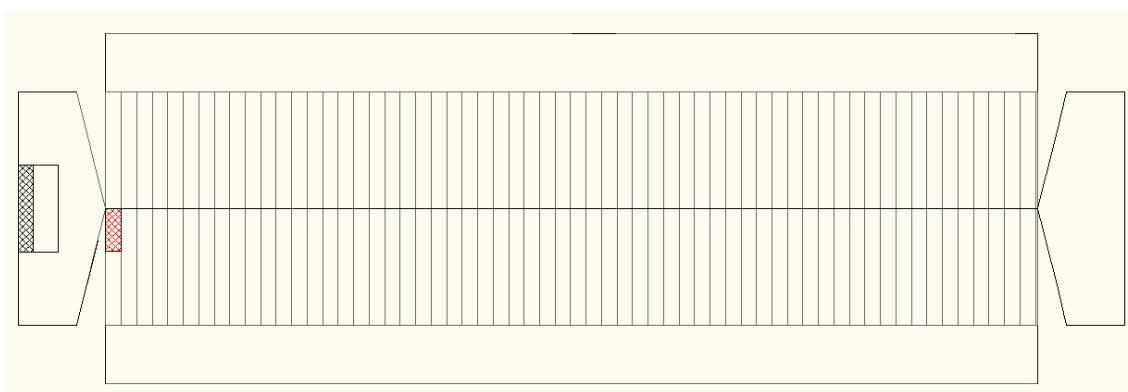


Ilustração 4.24 - Localização do fusível (a encarnado) e da abertura na face a barlavento (a preto).

Em seguida, o programa define a variável que diz respeito à área do fusível e as incógnitas de velocidade de entrada e velocidade de saída.

Com base nas dimensões do fusível, o programa decide qual o coeficiente de perda de pressão a utilizar (recorda-se aqui a possibilidade de recorrer a exdutores de cobertura destinados à desenfumagem em caso de incêndio em que os fabricantes indicam estes valores).

A rotina do pacote criado resolve o sistema de equações (3.52) em função das variáveis definidas na secção de “input”, e fornece o valor do coeficiente de pressão interna.

São também calculados outros dados de interesse, como a área do fusível e o carregamento ao qual o mesmo está sujeito no momento de activação. O coeficiente θ é o valor, ao qual neste trabalho se dá o nome de coeficiente de ventilação, que terá de ser multiplicado posteriormente na escala dos carregamentos inseridos no modelo computacional.

4.5 - Modelo computacional sujeito a carregamento de acordo com o modelo físico

À semelhança do modelo computacional definido de acordo com os carregamentos que constam do EC (ver [26]), as cargas necessárias à completa definição da acção do vento e peso próprio actuantes na estrutura, de acordo com o determinado experimentalmente, são as seguintes:

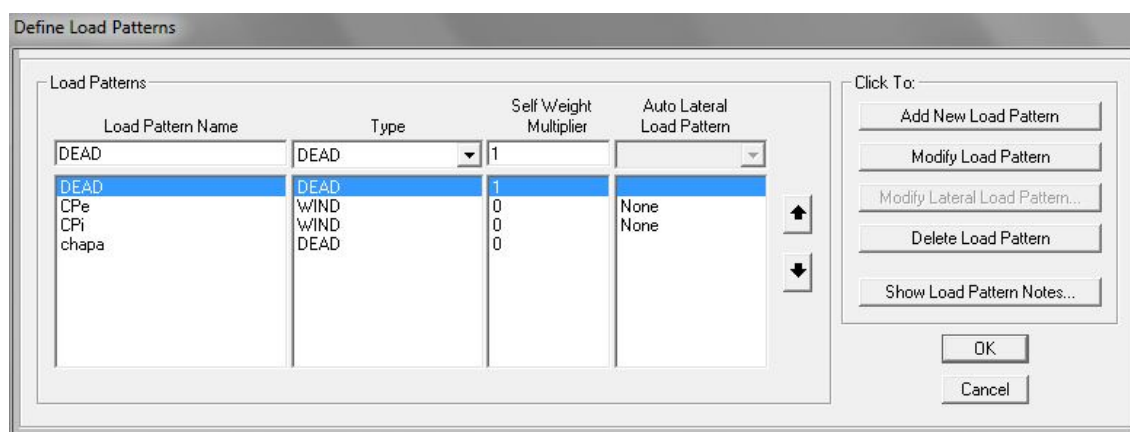


Ilustração 4.25 - Configuração de carregamentos no modelo computacional

O estudo da variação dos esforços na estrutura como resultado da ruptura do fusível, é feito com recurso à definição de combinações que traduzem estados de fusível inactivo e fusível activo, e dentro destes últimos definem-se várias configurações para o fusível activo (em termos de geometria e posição na envolvente do pavilhão). Estas combinações diferem entre si apenas na escala atribuída ao carregamento relativo à pressão interna, que é igual ao valor do coeficiente θ determinado pela rotina de Mathematica7.0.

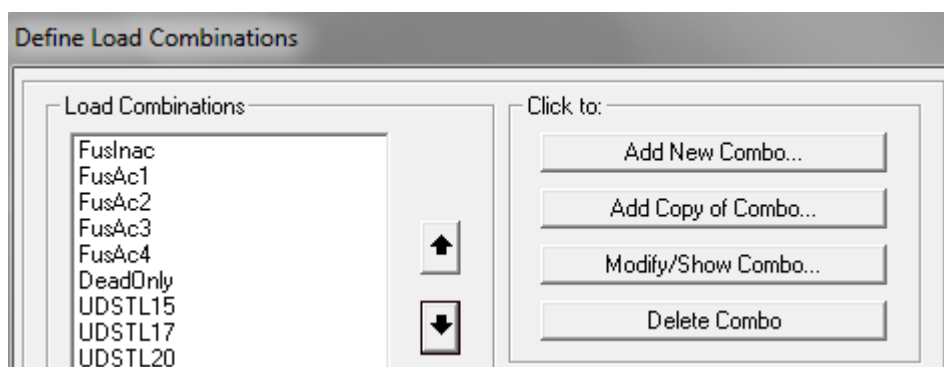


Ilustração 4.26 - Definição das combinações de carregamento

4.6 - Identificação dos elementos estruturais críticos

Por incremento gradual da pressão interna no pavilhão, identificaram-se os elementos estruturais que cedem em primeiro lugar, ou seja, aqueles cujo rácio entre esforço actuante e resistência é maior.

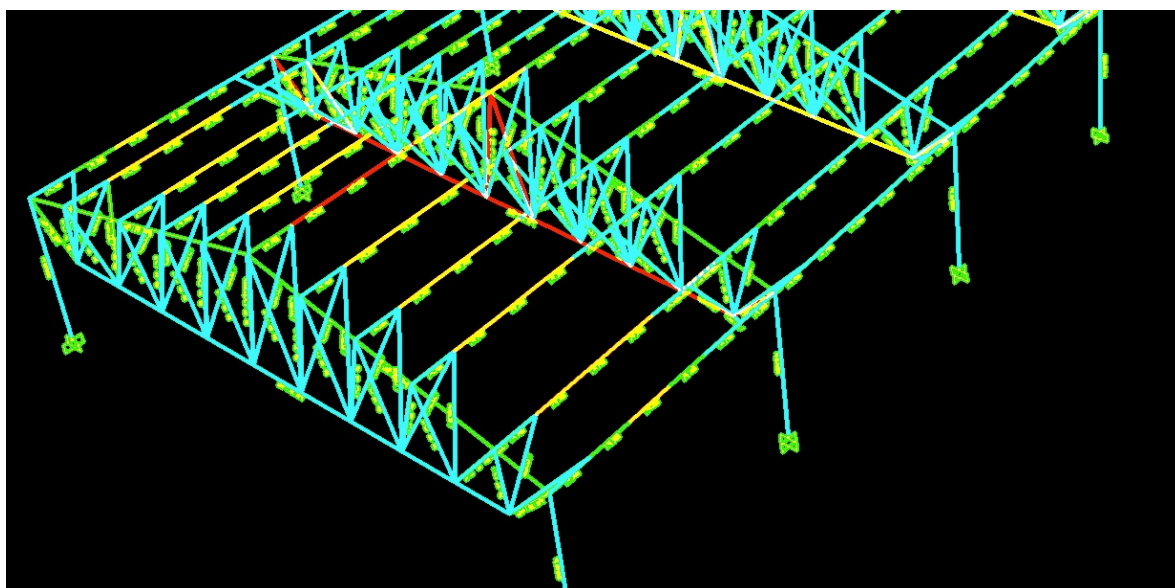


Ilustração 4.27 - Vista tridimensional do modelo computacional. Elementos críticos a encarnado.

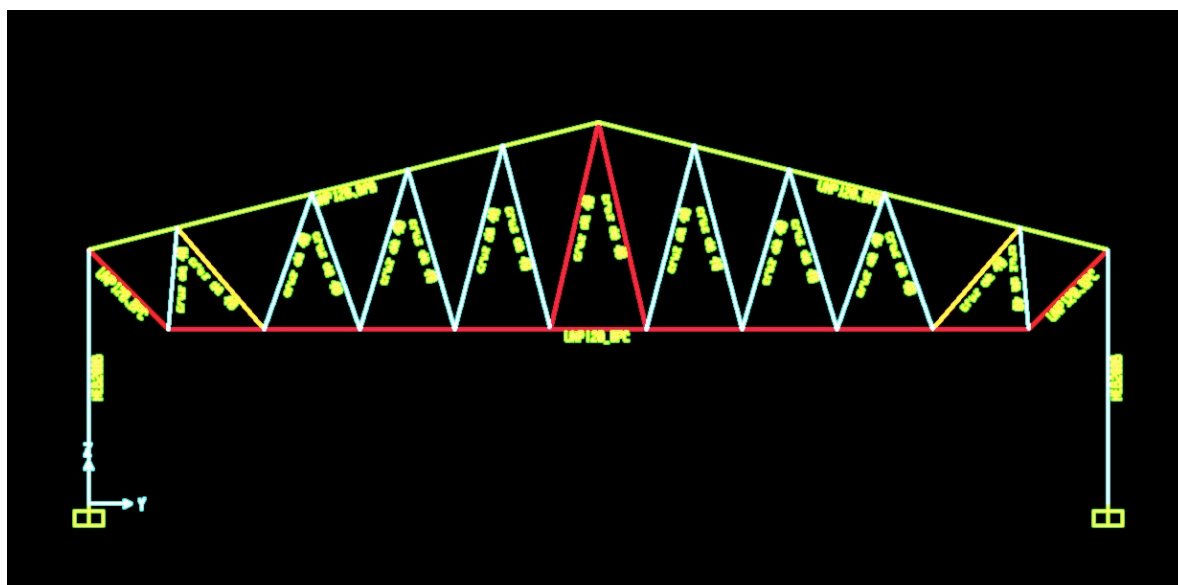


Ilustração 4.28 - Vista do pórtico do modelo computacional. Elementos críticos.

Como se pode ver nas ilustrações 4.27 e 4.28, os primeiros elementos a ceder pertencem à zona entre o primeiro e o segundo pórtico. Nas madres, cede o IPE200 de cumeeira e na treliça cedem todos os UNP120, assim como os dois elementos mais centrais do sistema triangulado (dupla cantoneira de 40mm).

Capítulo 5 - Resultados

5.1 - Consequências da abertura do fusível

Recorrendo ao programa de cálculo em Mathematica7.0 desenvolvido para o efeito, obtêm-se as seguintes quantidades (ver Anexo V), de acordo com as condições de abertura do fusível, definidas em 4.4.2:

- Coeficiente de pressão interna após abertura do fusível igual a 0,222 (o que representa um decréscimo de aproximadamente 63%);
- Pressão interna após o fusível ceder de 0,056 kPa.

A força resultante da pressão do vento para a qual o fusível terá de ser dimensionado é de 0,895 kN, que é o produto da pressão resultante por metro quadrado pela área da chapa de cobertura.

5.2 - Análise detalhada de um elemento estrutural crítico

Com o objectivo de ilustrar o efeito da inclusão do fusível descrito em 4.4.1, apresenta-se a análise em pormenor da optimização estrutural da madre de cumeeira entre o primeiro e segundo pórtico a contar da fachada a barlavento.

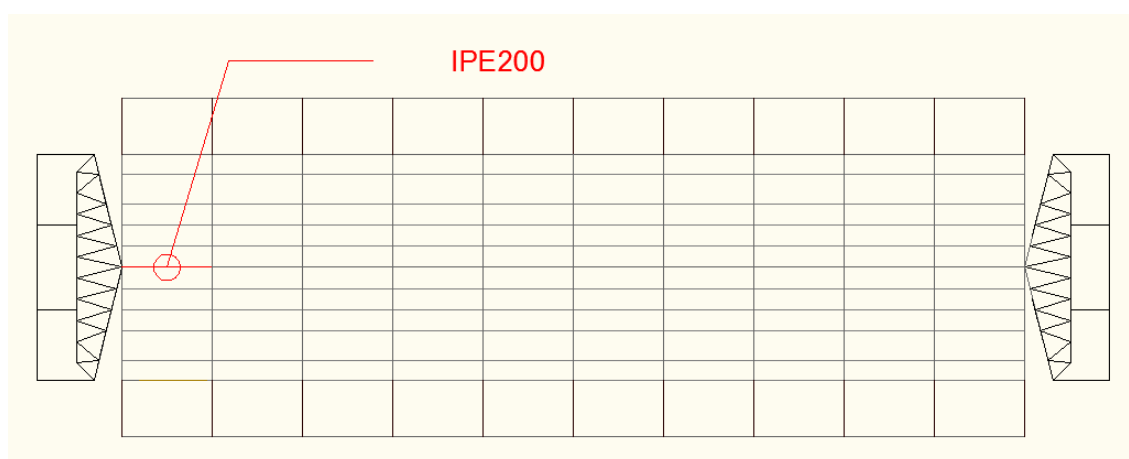


Ilustração 5.1 - Elemento crítico em estudo. IPE200.

PMM	DEMAND/CAPACITY RATIO										
	Governing	Total		P		MMajor		MMinor		Ratio	Status
	Equation	Ratio		Ratio		Ratio		Ratio		Limit	Check
	(5.5.4)	1,219	=	0,005	+	1,215	+	0,000		0,950	Overstress

Ilustração 5.2 - Dados dos rácios fornecidos pelo modelo computacional.

De acordo com a formulação do EC, o somatório dos rácios entre esforços actuantes e as resistências do elemento em termos esforço axial e flexão (tanto na direcção de maior como menor inércia) deve ser superior ao valor limite de 0,95. De acordo com os valores apresentados pelo software de cálculo, o momento na direcção de maior inércia é condicionante na cedência do elemento em questão. Como se pode ver, o rácio entre momento no eixo de maior inércia e a resistência do perfil nessa mesma direcção é de 1,215, o que só por si é já superior a 0,95.

De facto,

MOMENT DESIGN					
		M.Sd	Mc.Rd	Mv.Rd	Mb.Rd
		Moment	Capacity	Capacity	Capacity
Major	Moment	-16,072	67,663	67,663	13,054
Minor	Moment	1,682E-04	14,179	14,179	

Ilustração 5.3 - Dados de esforços fornecidos pelo modelo computacional, respeitantes ao elemento crítico em estudo.

O valor do esforço de flexão actuante excede o limite da capacidade do elemento em termos de flambagem, sendo que o valor solicitante é de 16,072 kNm e a resistência de apenas 13,054 kNm.

O esforço actuante neste elemento apresenta uma evolução em função da velocidade do vento da seguinte forma (função quadrática):

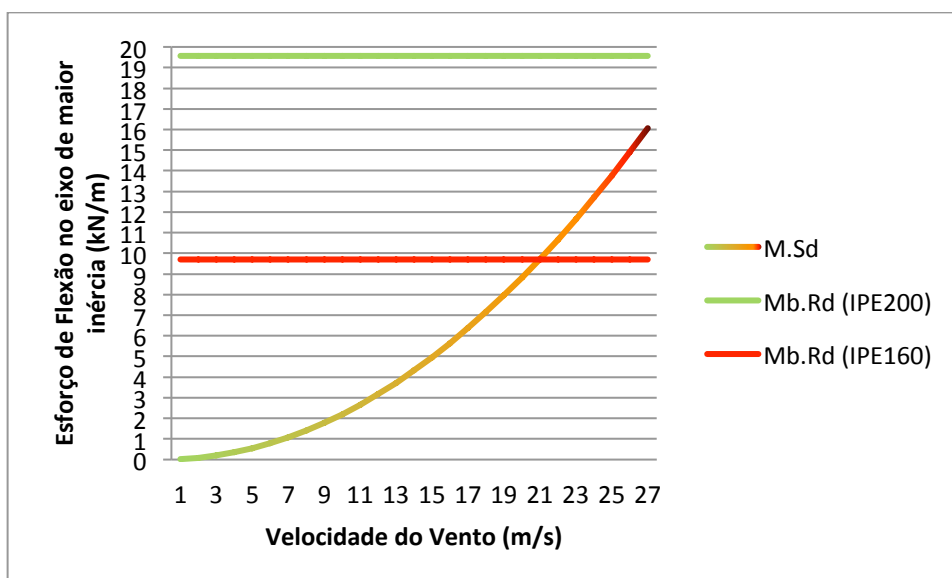


Ilustração 5.4 - Gráfico de esforço no elemento crítico versus velocidade do vento

Note-se que, para qualquer elemento em estudo, a função que traduz a relação entre a velocidade do vento e o esforço actuante é sempre quadrática, mudando apenas o valor da constante da parábola. Por exemplo, para um elemento genérico, A, tem-se:

$$K_A = \frac{\text{EsforçoActuante}_A}{\text{Velocidade do vento}^2} \quad (5.1)$$

Sabendo que o fusível foi dimensionado para ser activado a uma pressão correspondente à velocidade de 20 m/s, apresenta-se em seguida a evolução do valor de momento actuante, antes e após a activação do fusível:

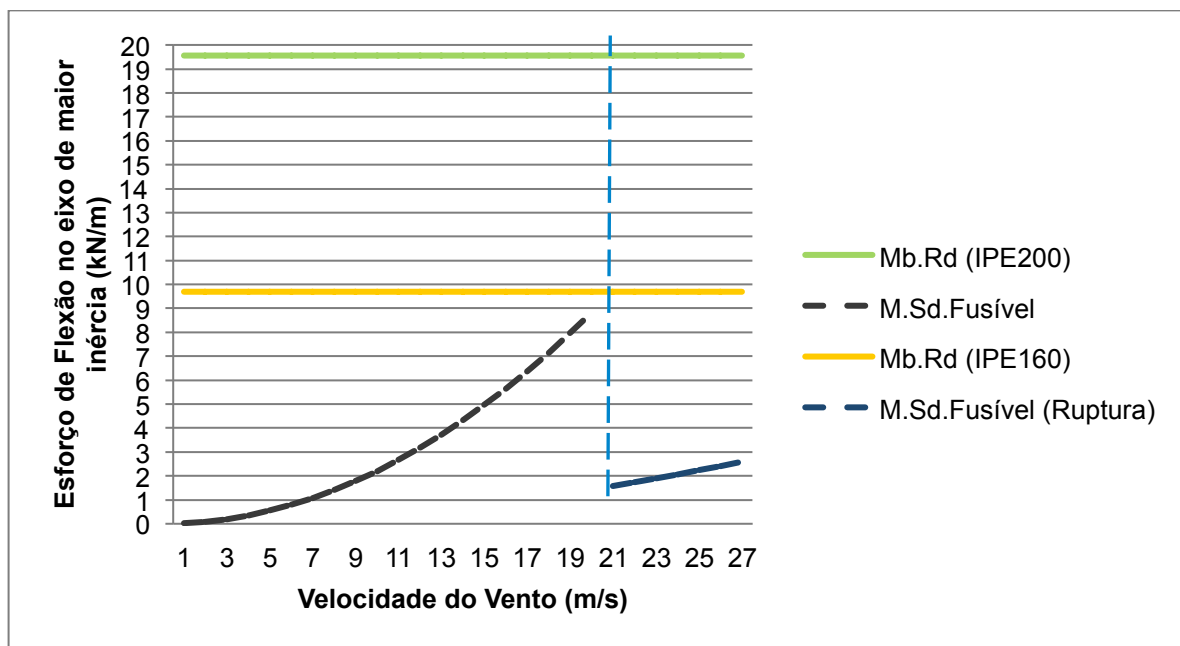


Ilustração 5.5 - Gráfico de esforço no elemento crítico versus velocidade do vento, considerando a activação do fusível aos 20 m/s.

Sendo que a recta a tracejado representa o momento em que o fusível é activado.

Como se pode constatar pelo gráfico, a ruptura do fusível aos 20 m/s torna possível reduzir o perfil do elemento em estudo de IPE200 para IPE180.

Para tirar o máximo partido do fusível, há que garantir que a fase ascendente da parábola após ruptura se cruza com o limiar de resistência do perfil seleccionado para uma velocidade igual à de dimensionamento.

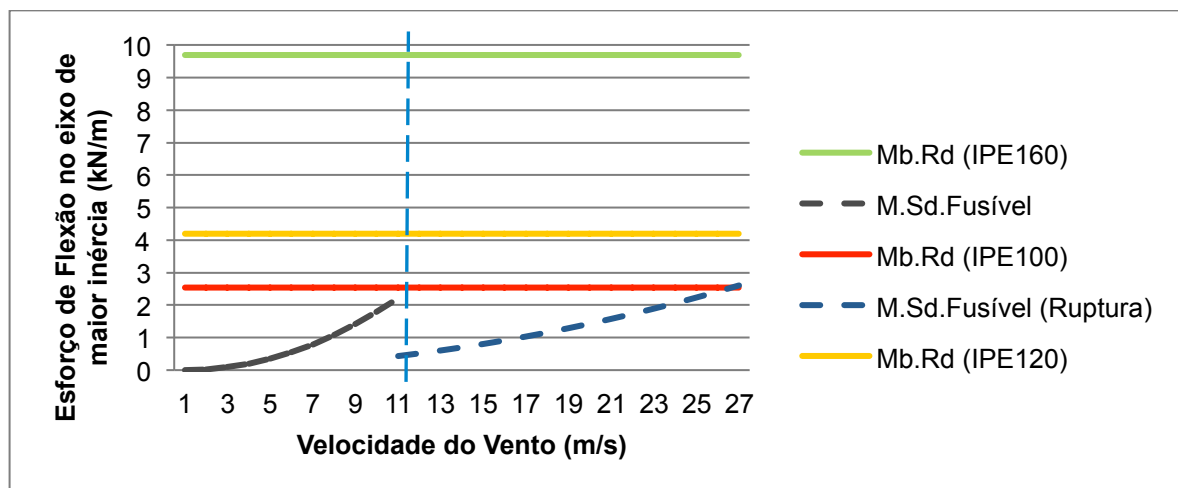


Ilustração 5.6 - Gráfico de esforço no elemento crítico versus velocidade do vento, considerando a activação do fusível aos 11 m/s.

Verifica-se que a ruptura do fusível aos 11m/s (velocidade para a qual o fusível deverá ser dimensionado para obter uma máxima redução nos esforços actuantes) transporta a parábola de flexão para valores ($M.Sd=2,605$ kN/m) que ultrapassam, por pouco, o limiar da resistência de um perfil IPE100 ($Mb.Rd=2,532$ kN/m).

Assim, é possível substituir os perfis IPE200 por perfis IPE120. O fusível será dimensionado para romper quando a velocidade do vento atingir os 14,5m/s (o que poderá ser uma vantagem em relação ao caso anterior uma vez que o fusível romperá com menos frequência).

Capítulo 6 – Conclusões

Neste estudo demonstra-se que o dimensionamento de estruturas com base apenas nos EC's, apesar de seguro (deverá sempre esperar-se que um código seja de índole mais genérica e sempre conservativo), tem margem para optimização. O recurso ao conhecimento multidisciplinar permitiu estabelecer uma aplicação genérica (se bem que ilustrada para um caso específico) de um conceito novo no dimensionamento de estruturas de pavilhões típicos do parque industrial português que, como se provou, é uma solução compatível com o EC e produz bons resultados na redução dos esforços actuantes na estrutura e na diminuição do seu peso próprio.

O estudo detalhado de um elemento crítico permite-nos concluir que o fusível considerado resulta numa redução da secção do perfil IPE200 para um perfil IPE120, o que corresponde a um decréscimo de 12,0 kg por metro. Uma vez que na estrutura estudada as madres que suportam a cobertura têm um comprimento total de 705 metros, temos uma redução de 8,46 toneladas de peso próprio dos elementos superiores da estrutura. Este decréscimo, associado ao decréscimo de esforços resultante da redução da pressão interna, levará certamente a uma redução dos esforços actuantes nos restantes elementos estruturais e suas secções (é óbvio, que a redução do peso próprio significa também a necessidade de recalcular o balanço das acções, o que num trabalho deste tipo se entendeu não justificar – processo repetitivo).

O trabalho aqui apresentado poderá conduzir a outros estudos como:

- Avaliação da viabilidade económica da solução proposta, avaliando os custos de reposição do fusível versus o ganho em material;
- Avaliação da aplicabilidade de fusíveis em outros tipos de edificações;
- Dimensionamento do fusível propriamente dito, de forma que ceda à pressão desejada;

- Estudo da viabilidade da adaptação de outras aberturas do edifício (janelas, portões, exdutores de cobertura, portas de acesso) à função de fusível;
- Adição, ao modelo computacional criado a partir dos resultados obtidos por modelação física, de um espectro de acção dinâmica do vento e comparar resultados;
- Aplicação do conceito de fusível a outras acções e códigos.

Referências e Bibliografia

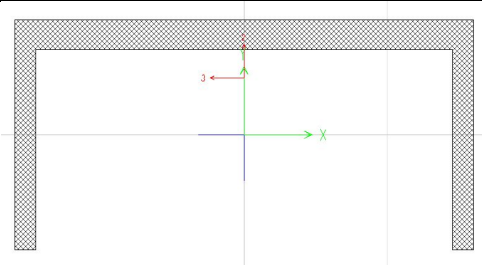
- [1] – EN1991-1-4 (2005) – “Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind Actions”, European Committee for Standardization (CEN), Brussels
- [2] – EN1993 (2003) – “Eurocode 3: Design of steel Structures”, European Committee for Standardization (CEN), Brussels
- [3] – Solari, G. (2007) – “The International Association for Wind Engineering (IAWE): Progress and prospects”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. University of Genoa, Italy.
- [4] – Baker, C.J. (2007) – “Wind engineering – Past, present and future.”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. University of Birmingham, United Kingdom
- [5] – Davenport, A.G. (1990) – “The variability of low building wind loads due to surrounding obstructions”. The Sixth U.S. National Conference on Wind Engineering. University of Western Ontario, Canada.
- [6] – ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
<http://www.ecmwf.int/>
- [7] – Tamura, Y., Kikuchi, H., Hibi, K. (2007) – “Peak normal stresses and effects of wind direction on wind load combinations for medium-rise buildings”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Tokyo Polytechnic University, Japan.
- [8] – Sharma, R.N., Richards, P.J. (2004) – “Net pressures on the roof of a low-rise building with wall openings”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. University of Auckland, New Zealand.
- [9] – Bowen, A.J. (2003) – “Modelling of strong wind flows over complex terrain at small geometric scales”. University of Canterbury, New Zealand.
- [10] – Kasperski, M. (2002) – “Specification of the design wind load based on wind tunnel experiments”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Ruhr- University Bochum, Germany.
- [11] – Kasperski, M. (2002) – “Design wind loads for a low-rise building taking into account directional effects”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Ruhr- University Bochum, Germany.
- [12] – Larose, G.L., D’Auteuil, A. (2007) – “Experiments on 2D rectangular prisms at high Reynolds numbers in a pressurised wind tunnel”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. University of Ottawa, Canada.
- [13] – Lin, N., Letchford, C., Holmes, J. (2005) – “Investigation of plate-type windborne debris. Part I. Experiments in wind tunnel and full scale”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Texas Tech University, United States of America
- [14] – Natalini, B., Marighetti, J.O., Natalini, M.B. (2002) – “Wind tunnel modelling of mean pressures on planar canopy roof”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.

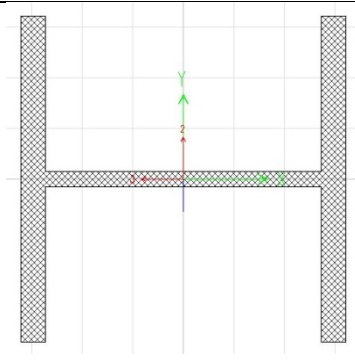
- [15] – Paulotto, C., Ciampoli, M., Augusti, G. (2006) – “Wind tunnel evaluation of mean wind pressure on a frame-type signboard”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Università “La Sapienza”, Italy.
- [16] – Pindado, S., Meseguer, J., (2003) – “Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
- [17] – Masters, F., Gurley, K., Gregory, A.K. (2009) – “Multivariate stochastic simulation of wind pressure over low-rise structures through linear model interpolation”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. University of Western Ontario, Canada.
- [18] – Tieleman, H.W. (2003) – “Wind tunnel simulation of wind loading on low-rise structures: a review”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Virginia Polytechnic Institute and State University, United States of America.
- [19] – Uematsu, Y., Stathopoulos, T., Izumi, E. (2007) – “Wind loads on free-standing canopy roofs: Part 1 local wind pressures”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Tohoku University, Japan.
- [20] – Zasso, A., Giappino, S., Muggiasca, S. (2006) – “Wind tunnel study of a cone-like shaped roof: Reynolds number effects”. *Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics*. Politecnico di Milano, Italy.
- [21] – Jiang, Y., Alexander, D., Jenkins, H., Arthur, R., Chen, Q. (2002) – “Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Massachusetts Institute of Technology, United States of America
- [22] – Karava, P., Stathopoulos, T., Athienitis, A.K. (2006) – “Wind-induced natural ventilation analysis”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Concordia University, Canada.
- [23] – Khan, N., Su, Y., Riffat, S.B. (2008) – “A review on wind driven ventilation techniques”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. University of Nottingham, United Kingdom.
- [24] – van Moeseke, G., Gratia, E., Reiter, S., De Herde, A. (2004) – “Wind pressure distribution influence on natural ventilation for different incidences and environment densities”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Université Catholique de Louvain, Belgium.
- [25] – Saraiva, J.A.G., Delgado, J.F.A.D, Borges, A.R.J. (1985) – “Pavilhões Industriais: Solicitações, interferência e ventilação natural”. LNEC, Portugal.
- [26] – Cermak, J.E. (2002) – “Wind-tunnel development and trends in applications to civil engineering”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Colorado State University, United States of America.

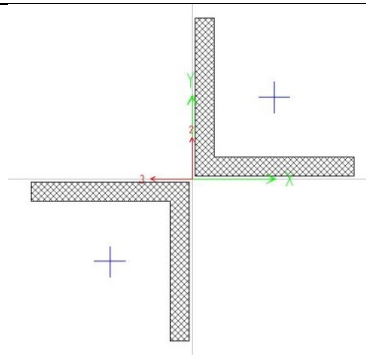
- [27] – Neves, L.C., Marchão, C. (2009) – “Acção do vento segundo o EC1”. Apontamentos das aulas de Segurança e Dimensionamento Estrutural. Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- [28] – Liu, Z., Prevatt, D.O., Aponte-Bermudez, L.D., Gurley, K.R., Reinhold, T.A., Akins R.E. (2009) – “Field measurement and wind tunnel simulation of hurricane wind loads on a single family dwelling”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. University of Florida, United States of America.
- [29] – Gonçalves da Silva, J.A. (2008) – “Modelação Física e Matemática em Engenharia”. Apontamentos de apoio à disciplina de Modelação Física e Matemática em Engenharia. Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- [30] – Leal, J., Franca, M.J. (2010) – “Modelos Reduzidos e Computacionais em Engenharia”. Apontamentos de apoio à disciplina de Modelos Reduzidos e Computacionais em Engenharia. Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- [31] – Carneiro, F.L. (1993) – “Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- [32] – Wikipédia – <http://www.wikipedia.org>
- [33] – Mota, V.F. (1972) – “Curso de Teoria da Semelhança”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- [34] – Borges, A.R.J. (1968) – “O túnel aerodinâmico do Laboratório Nacional de Engenharia Civil”. LNEC, Portugal.
- [35] – Lucínio (2007) – “AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado”. <http://www.prof2000.pt/users/lpa/apresentacoes%20electronicas.html>
- [36] – Nunes, D.A. (2006) – “Estudo da ventilação natural por efeito do vento em pavilhões industriais utilizando modelos reduzidos”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- [37] – Nunes, P.E.V. (2008) – “Acção do vento em coberturas metálicas – Modelação de uma estrutura do tipo “sombreador””. Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- [38] – Barbosa, M.P. (2007) – “Análise dimensional e semelhança”. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.
- [39] – <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/boundlay.html>
- [40] – Ignácio, R. F. (2006) – “Escoamento externo – Complemento de mecânica dos fluidos”. Centro Universitário da FEI, Brasil
- [41] – Tamura, Y., Hikuchi, H., Hibi, K. (2003) – “Quasi-static wind load combinations for low- and middle-rise buildings”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Tokyo Polytechnic University, Japan.
- [42] – “Grande Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa”. Temas & Debates. Lisboa, Portugal.

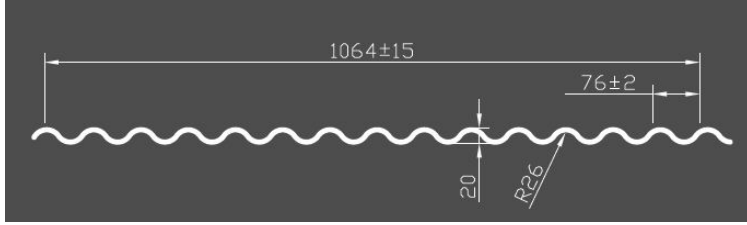
- [43] – Simões, R.A.D. (2007) – “Manual de dimensionamento de estruturas metálicas”. Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista. Universidade de Coimbra, Portugal.
- [44] - Tamura, Y., Hikuchi, H., Hibi, K. (2001) – “Extreme wind pressure distributions on low rise building models”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Tokyo Polytechnic University, Japan.
- [45] – Davenport, A.G. (1967) – “The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading”. Proceedings of the international Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures. University of Ottawa, Canada.
- [46] – RSA – Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, Decreto – Lei nº235/83.
- [47] – Cengel, Y.A., Cimbala, J.M. (2004) – “Fluid Mechanics: Fundamentals and applications”. 1ª Edição, McGraw-Hill.
- [48] – Timoshenko, S., Young, D.H. (1965) – “Theory of Structures”. 2ª Edição, McGraw-Hill.
- [49] – Simiu, E., Scanlan, R.H. (1996) – “Wind Effects on Structures: Fundamentals and applications to design”. 3rd Edition, John Wiley & Sons
- [50] – Temam, R. (2001) – “Navier-Stokes equations: Theory and Numerical Analysis”. 2nd Edition, American Mathematical Society

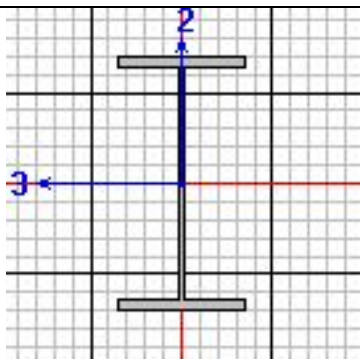
ANEXO I

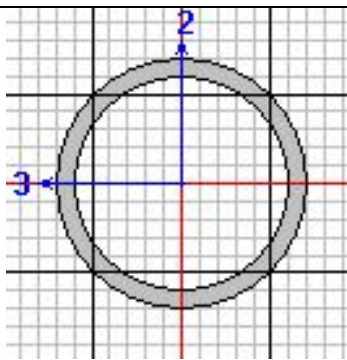
UNP120	
Área da Secção	$1,35 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Inércia segundo o eixo 3	$4,32 \times 10^{-7} \text{ m}^4$
Inércia segundo o eixo 2	$3,64 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
Raio de giração segundo o eixo 3	0,0159 m
Raio de giração segundo o eixo 2	0,0462 m

HEB200B	
Área da Secção	$7,530 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Inércia segundo o eixo 3	$2,001 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Inércia segundo o eixo 2	$5,513 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Raio de giração segundo o eixo 3	0,0516 m
Raio de giração segundo o eixo 2	0,0856 m

Dupla Cantoneira L40x40x8	
Área da Secção	$1,15 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Inércia segundo o eixo 3	$3,523 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
Inércia segundo o eixo 2	$3,523 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
Raio de giração segundo o eixo 3	0,0175 m
Raio de giração segundo o eixo 2	0,0175 m

Chapa perfilada P4-4-76-20	
Largura Efectiva	1,064 m
Espessura	0,7 mm
Peso Próprio	$0,0646 \text{ kN/m}^2$

IPE200	
Área da Secção	$2,848 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Inércia segundo o eixo 3	$1,943 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Inércia segundo o eixo 2	$1,420 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
Raio de giração segundo o eixo 3	0,0826 m
Raio de giração segundo o eixo 2	0,0224 m

Tubo de 33,7mm	
Área da Secção	$2,540 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Inércia segundo o eixo 3	$3,093 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
Inércia segundo o eixo 2	$3,093 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
Raio de giração segundo o eixo 3	0,011 m
Raio de giração segundo o eixo 2	0,011 m

ANEXO II

Coefficientes de pressão externa para uma incidência a 0°:

Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe
1	0,239	38	-0,181	75	-0,302	112	-0,164
2	0,331	39	-0,243	76	-0,247	113	-0,228
3	0,346	40	-0,233	77	-0,278	114	-0,211
4	0,397	41	-0,252	78	-0,240	115	-0,224
5	0,373	42	-0,242	79	-0,305	116	-0,192
6	0,294	43	-0,230	80	-0,259	117	-0,201
7	0,160	44	-0,225	81	-0,293	118	-0,199
8	0,365	45	-0,168	82	-0,205	119	-0,172
9	0,555	46	-0,170	83	-0,338	120	-0,227
10	0,649	47	-0,214	84	-0,272	121	-0,229
11	0,566	48	-0,218	85	-0,248	122	-0,205
12	0,538	49	-0,237	86	-0,200	123	-0,244
13	0,494	50	-0,166	87	-0,275	124	-0,164
14	0,386	51	-0,134	88	-0,253	125	-0,139
15	-0,889	52	-0,161	89	-0,204	126	-0,153
16	-0,842	53	-0,205	90	-0,177	127	-0,232
17	-0,850	54	-0,174	91	-0,252	128	-0,192
18	-0,847	55	-0,176	92	-0,203	129	-0,174
19	-1,069	56	-0,182	93	-0,279	130	-0,190
20	-0,930	57	-0,204	94	-0,182	131	-0,215
21	-0,525	58	-0,180	95	-0,274	132	-0,173
22	-0,628	59	-0,206	96	-0,201	133	-0,204
23	-0,811	60	-0,166	97	-0,233	134	-0,147
24	-0,705	61	-0,194	98	-0,188	135	-0,180
25	-0,794	62	-0,124	99	-0,233	136	-0,113
26	-0,724	63	-0,185	100	-0,182	137	-0,214
27	-0,538	64	-0,146	101	-0,189	138	-0,147
28	-0,534	65	-0,242	102	-0,171	139	-0,323
29	-0,305	66	-0,195	103	-0,202	140	-0,216
30	-0,339	67	-0,239	104	-0,220	141	-0,389
31	-0,366	68	-0,186	105	-0,211	142	-0,356
32	-0,399	69	-0,261	106	-0,197	143	-0,590
33	-0,434	70	-0,171	107	-0,228	144	-0,654
34	-0,431	71	-0,264	108	-0,212	145	-0,818
35	-0,485	72	-0,276	109	-0,201	146	-0,882
36	-0,426	73	-0,165	110	-0,191	147	-0,774
37	-0,281	74	-0,190	111	-0,283	148	-0,859

Coeficientes de pressão externa para uma incidência a 30°:

Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe
1	0,449	38	-0,392	75	-0,373	112	-0,296
2	0,376	39	-0,399	76	-0,308	113	-0,337
3	0,297	40	-0,483	77	-0,357	114	-0,377
4	0,293	41	-0,748	78	-0,347	115	-0,512
5	0,199	42	-0,446	79	-0,426	116	-0,335
6	0,100	43	-0,392	80	-0,350	117	-0,273
7	-0,104	44	-0,507	81	-0,403	118	-0,264
8	0,455	45	-0,069	82	-0,245	119	-0,079
9	0,459	46	-0,404	83	-0,381	120	-0,395
10	0,469	47	-0,402	84	-0,364	121	-0,350
11	0,338	48	-0,506	85	-0,358	122	-0,405
12	0,286	49	-0,695	86	-0,318	123	-0,553
13	0,156	50	-0,357	87	-0,400	124	-0,300
14	0,013	51	-0,243	88	-0,375	125	-0,197
15	-0,266	52	-0,304	89	-0,276	126	-0,209
16	-0,763	53	-0,095	90	-0,239	127	-0,108
17	-1,232	54	-0,054	91	-0,346	128	-0,062
18	-1,044	55	-0,376	92	-0,354	129	-0,304
19	-1,128	56	-0,374	93	-0,398	130	-0,332
20	-0,791	57	-0,464	94	-0,251	131	-0,413
21	-0,028	58	-0,575	95	-0,179	132	-0,502
22	-0,276	59	-0,399	96	-0,328	133	-0,365
23	-0,345	60	-0,257	97	-0,309	134	-0,223
24	-0,337	61	-0,301	98	-0,310	135	-0,271
25	-0,810	62	-0,195	99	-0,449	136	-0,158
26	-0,816	63	-0,072	100	-0,299	137	-0,091
27	-0,680	64	-0,203	101	-0,252	138	-0,274
28	-0,609	65	-0,113	102	-0,236	139	-0,152
29	-0,033	66	-0,281	103	-0,098	140	-0,542
30	-0,479	67	-0,119	104	-0,375	141	-0,169
31	-0,352	68	-0,268	105	-0,306	142	-0,672
32	-0,468	69	-0,138	106	-0,343	143	-0,083
33	-0,713	70	-0,247	107	-0,470	144	-0,724
34	-0,563	71	-0,192	108	-0,353	145	-0,068
35	-0,621	72	-0,168	109	-0,303	146	-0,059
36	-0,569	73	-0,253	110	-0,250	147	-0,669
37	-0,131	74	-0,271	111	-0,157	148	-0,686

Coeficientes de pressão externa para uma incidência a 45°:

Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe
1	0,217	38	-0,555	75	-0,397	112	-0,454
2	0,165	39	-0,531	76	-0,333	113	-0,441
3	0,073	40	-0,708	77	-0,384	114	-0,522
4	0,061	41	-1,091	78	-0,374	115	-0,732
5	-0,046	42	-0,621	79	-0,458	116	-0,522
6	-0,095	43	-0,480	80	-0,377	117	-0,409
7	-0,283	44	-0,477	81	-0,437	118	-0,353
8	0,222	45	0,055	82	-0,280	119	0,048
9	0,131	46	-0,575	83	-0,425	120	-0,590
10	0,127	47	-0,551	84	-0,394	121	-0,479
11	-0,007	48	-0,746	85	-0,386	122	-0,596
12	-0,029	49	-1,117	86	-0,345	123	-0,824
13	-0,156	50	-0,512	87	-0,430	124	-0,498
14	-0,236	51	-0,306	88	-0,415	125	-0,307
15	-0,218	52	-0,291	89	-0,346	126	-0,332
16	-0,238	53	0,084	90	-0,284	127	0,039
17	-0,550	54	0,124	91	-0,395	128	0,090
18	-1,124	55	-0,549	92	-0,415	129	-0,465
19	-1,463	56	-0,505	93	-0,458	130	-0,481
20	-0,821	57	-0,671	94	-0,317	131	-0,631
21	0,266	58	-0,912	95	-0,040	132	-0,857
22	-0,590	59	-0,597	96	-0,464	133	-0,603
23	-0,366	60	-0,353	97	-0,369	134	-0,354
24	-0,534	61	-0,353	98	-0,389	135	-0,349
25	-1,039	62	-0,263	99	-0,566	136	-0,242
26	-0,565	63	0,105	100	-0,402	137	0,087
27	-0,484	64	-0,319	101	-0,341	138	-0,299
28	-0,609	65	0,082	102	-0,318	139	0,091
29	0,173	66	-0,398	103	0,044	140	-0,602
30	-0,784	67	0,071	104	-0,567	141	0,139
31	-0,429	68	-0,387	105	-0,382	142	-0,720
32	-0,617	69	0,049	106	-0,450	143	0,200
33	-1,121	70	-0,352	107	-0,627	144	-0,737
34	-0,620	71	-0,060	108	-0,509	145	0,344
35	-0,552	72	0,014	109	-0,425	146	0,415
36	-0,615	73	-0,353	110	-0,345	147	-0,695
37	0,039	74	-0,357	111	0,023	148	-0,730

Coeficientes de pressão externa para uma incidência a 60°:

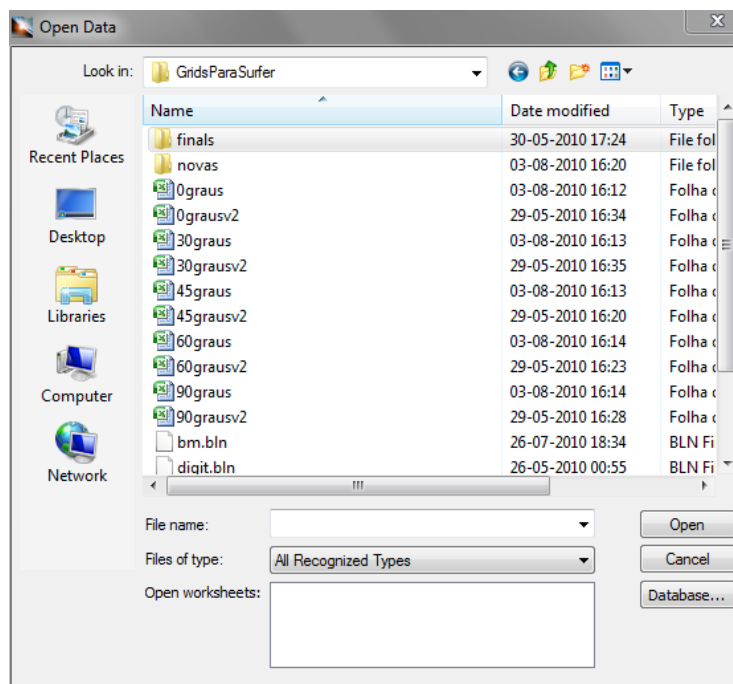
Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe
1	-0,330	38	-0,596	75	-0,489	112	-0,451
2	-0,149	39	-0,590	76	-0,426	113	-0,402
3	-0,204	40	-0,808	77	-0,484	114	-0,470
4	-0,209	41	-1,281	78	-0,476	115	-0,625
5	-0,315	42	-0,665	79	-0,549	116	-0,514
6	-0,305	43	-0,470	80	-0,435	117	-0,442
7	-0,430	44	-0,366	81	-0,463	118	-0,358
8	-0,254	45	0,214	82	-0,369	119	0,182
9	-0,241	46	-0,710	83	-0,572	120	-0,575
10	-0,210	47	-0,577	84	-0,532	121	-0,438
11	-0,288	48	-0,802	85	-0,496	122	-0,539
12	-0,278	49	-1,196	86	-0,440	123	-0,706
13	-0,392	50	-0,605	87	-0,506	124	-0,499
14	-0,411	51	-0,346	88	-0,449	125	-0,343
15	-0,283	52	-0,343	89	-0,405	126	-0,371
16	-0,267	53	0,253	90	-0,324	127	0,222
17	-0,528	54	0,307	91	-0,436	128	0,277
18	-0,934	55	-0,545	92	-0,465	129	-0,491
19	-0,752	56	-0,481	93	-0,520	130	-0,449
20	-0,631	57	-0,645	94	-0,360	131	-0,584
21	0,329	58	-0,852	95	0,103	132	-0,738
22	-0,673	59	-0,700	96	-0,513	133	-0,671
23	-0,412	60	-0,475	97	-0,378	134	-0,478
24	-0,606	61	-0,426	98	-0,396	135	-0,436
25	-1,226	62	-0,316	99	-0,558	136	-0,315
26	-0,582	63	0,255	100	-0,426	137	0,247
27	-0,450	64	-0,357	101	-0,374	138	-0,344
28	-0,566	65	0,255	102	-0,319	139	0,256
29	0,238	66	-0,420	103	0,174	140	-0,559
30	-0,786	67	0,240	104	-0,621	141	0,320
31	-0,498	68	-0,404	105	-0,366	142	-0,661
32	-0,738	69	0,215	106	-0,425	143	0,399
33	-1,198	70	-0,381	107	-0,568	144	-0,777
34	-0,695	71	0,031	108	-0,510	145	0,423
35	-0,572	72	0,168	109	-0,442	146	0,591
36	-0,435	73	-0,398	110	-0,362	147	-0,784
37	0,200	74	-0,400	111	0,186	148	-0,819

Coeficientes de pressão externa para uma incidência a 90°:

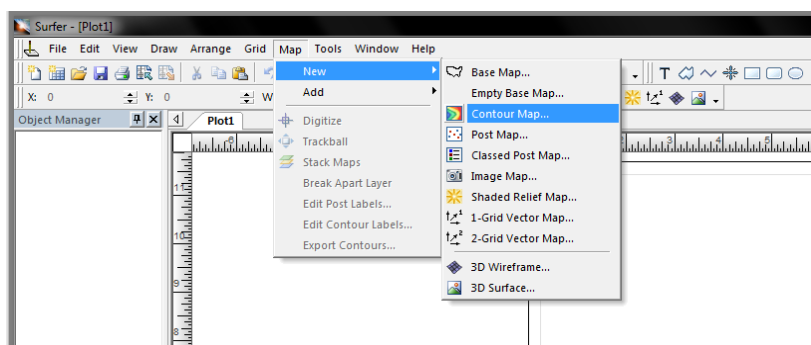
Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe	Ponto	Cpe
1	-0,847	38	-0,531	75	-0,847	112	-0,531
2	-0,646	39	-0,481	76	-0,646	113	-0,481
3	-0,574	40	-0,601	77	-0,574	114	-0,601
4	-0,469	41	-0,860	78	-0,469	115	-0,860
5	-0,477	42	-0,684	79	-0,477	116	-0,684
6	-0,356	43	-0,555	80	-0,356	117	-0,555
7	-0,413	44	-0,430	81	-0,413	118	-0,430
8	-0,685	45	0,245	82	-0,685	119	0,245
9	-0,835	46	-0,614	83	-0,835	120	-0,614
10	-0,697	47	-0,448	84	-0,697	121	-0,448
11	-0,620	48	-0,568	85	-0,620	122	-0,568
12	-0,451	49	-0,745	86	-0,451	123	-0,745
13	-0,450	50	-0,542	87	-0,450	124	-0,542
14	-0,406	51	-0,375	88	-0,406	125	-0,375
15	-0,511	52	-0,390	89	-0,511	126	-0,390
16	-0,384	53	0,301	90	-0,384	127	0,301
17	-0,556	54	0,362	91	-0,556	128	0,362
18	-0,780	55	-0,464	92	-0,780	129	-0,464
19	-0,630	56	-0,397	93	-0,630	130	-0,397
20	-0,426	57	-0,497	94	-0,426	131	-0,497
21	0,236	58	-0,581	95	0,236	132	-0,581
22	-0,645	59	-0,574	96	-0,645	133	-0,574
23	-0,456	60	-0,451	97	-0,456	134	-0,451
24	-0,569	61	-0,430	98	-0,569	135	-0,430
25	-0,967	62	-0,316	99	-0,967	136	-0,316
26	-0,607	63	0,311	100	-0,607	137	0,311
27	-0,487	64	-0,382	101	-0,487	138	-0,382
28	-0,481	65	0,327	102	-0,481	139	0,327
29	0,255	66	-0,540	103	0,255	140	-0,540
30	-0,785	67	0,339	104	-0,785	141	0,339
31	-0,458	68	-0,611	105	-0,458	142	-0,611
32	-0,608	69	0,359	106	-0,608	143	0,359
33	-0,931	70	-0,625	107	-0,931	144	-0,625
34	-0,732	71	0,221	108	-0,732	145	0,221
35	-0,610	72	0,423	109	-0,610	146	0,423
36	-0,484	73	-0,646	110	-0,484	147	-0,646
37	0,254	74	-0,642	111	0,254	148	-0,642

ANEXO III

1. Transformação dos ficheiros de dados (em MsExcel) em ficheiros de grelha, suportados pelo software.

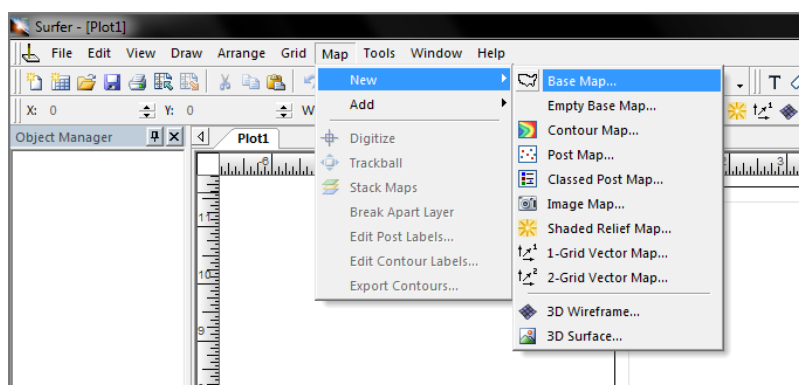


2. Criação de um mapa de contornos, a partir da grelha criada:

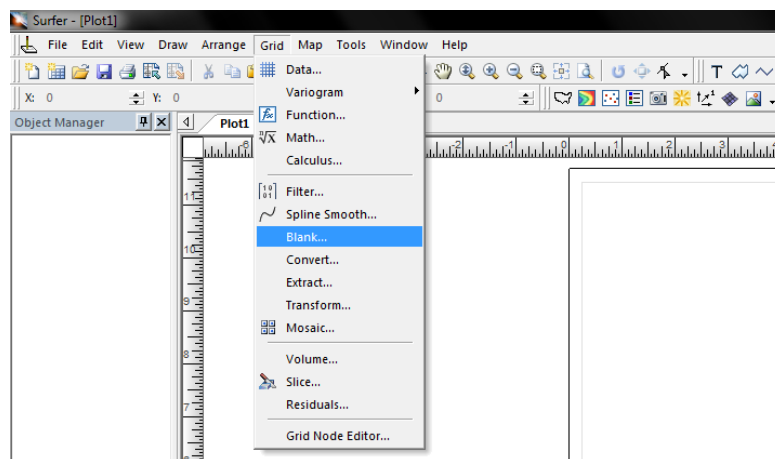


3. Criação de um “Boundary File”, que serve para recortar o mapa de contorno para que se assemelhe à superfície do modelo, facilitando assim a sua interpretação.

Este procedimento consiste na criação de uma folha MsExcel com um número suficiente de coordenadas para uma completa descrição do contorno da superfície. Esse ficheiro MsExcel será transformado num “Boundary File” com a opção de criação de “Base Maps”.



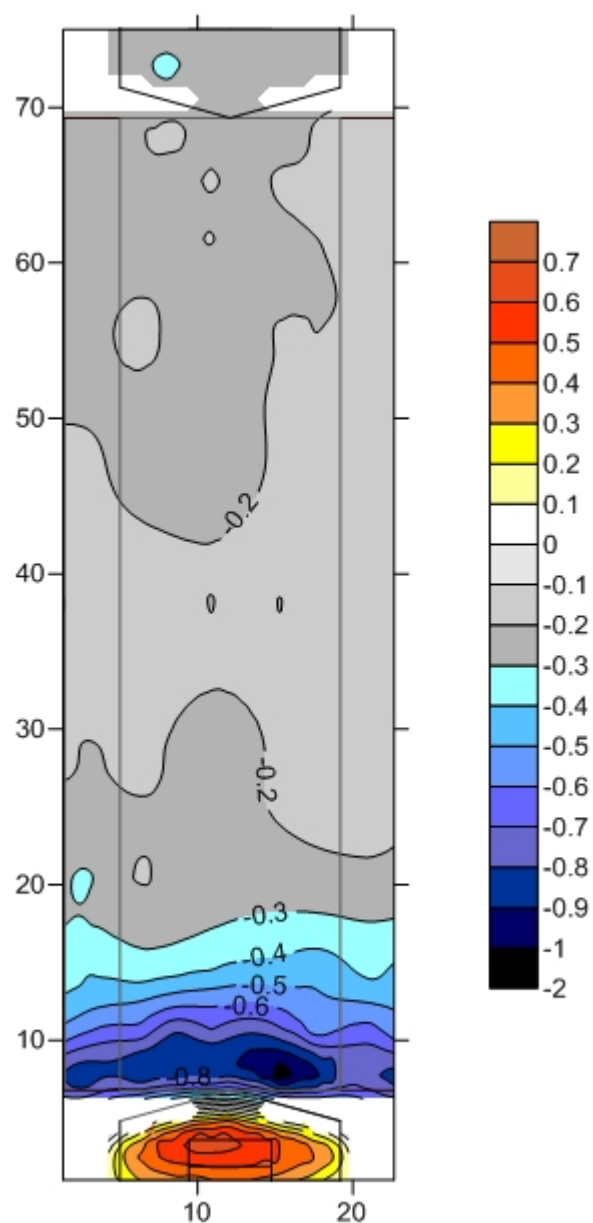
4. Sobreposição da “Boundary File” ao “Contour Map”, utilizando a opção “Blank”.



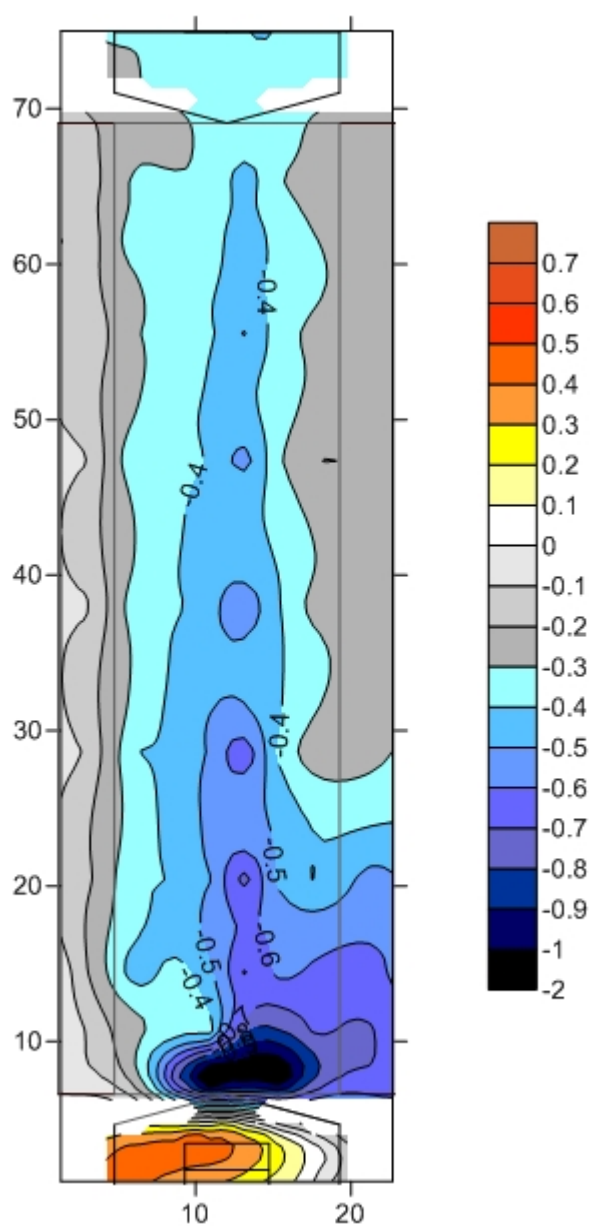
O resultado gerado é o mapa de isobáricas. O refinamento das linhas, legenda e código de cores podem ser alterados nas propriedades do mapa de contorno.

ANEXO IV

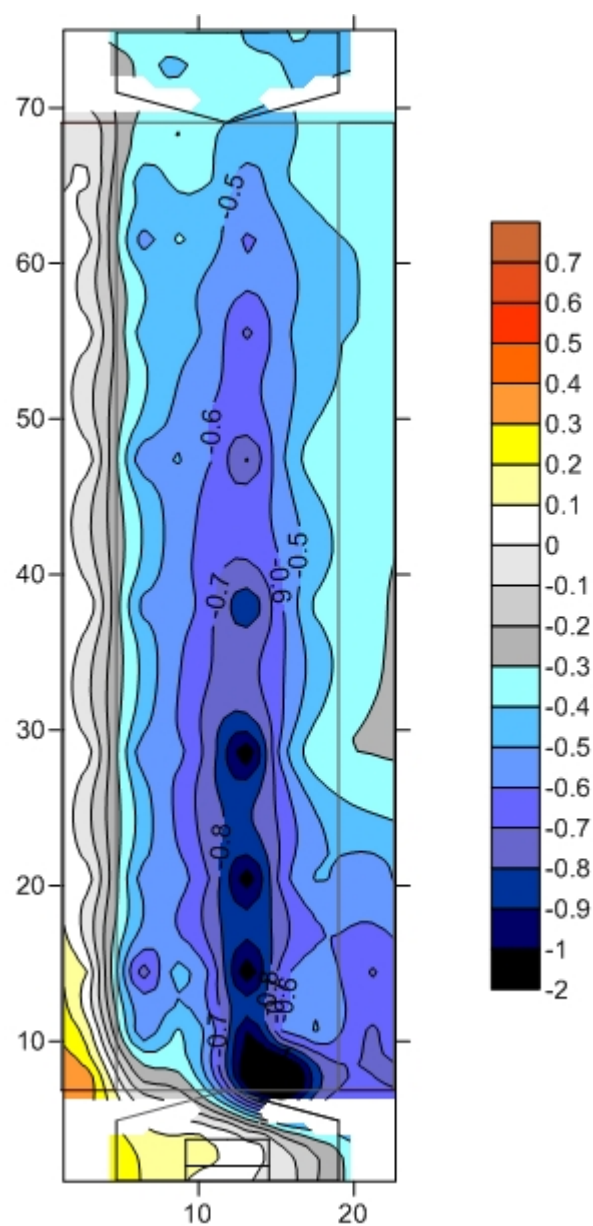
Mapa de isobáricas para incidência a 0°:



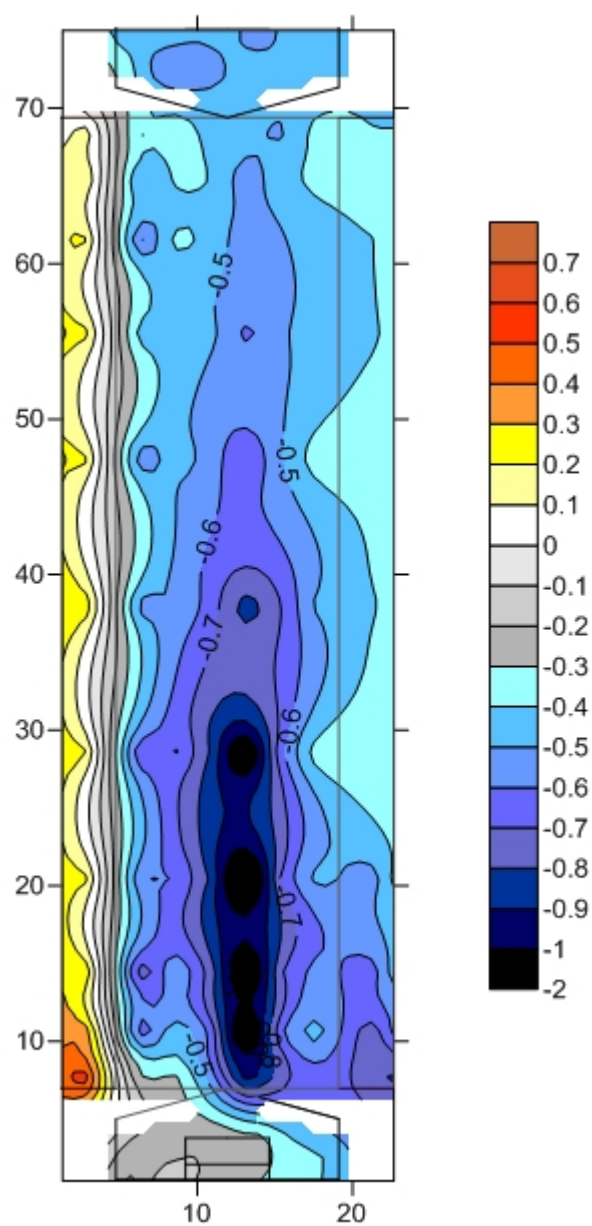
112



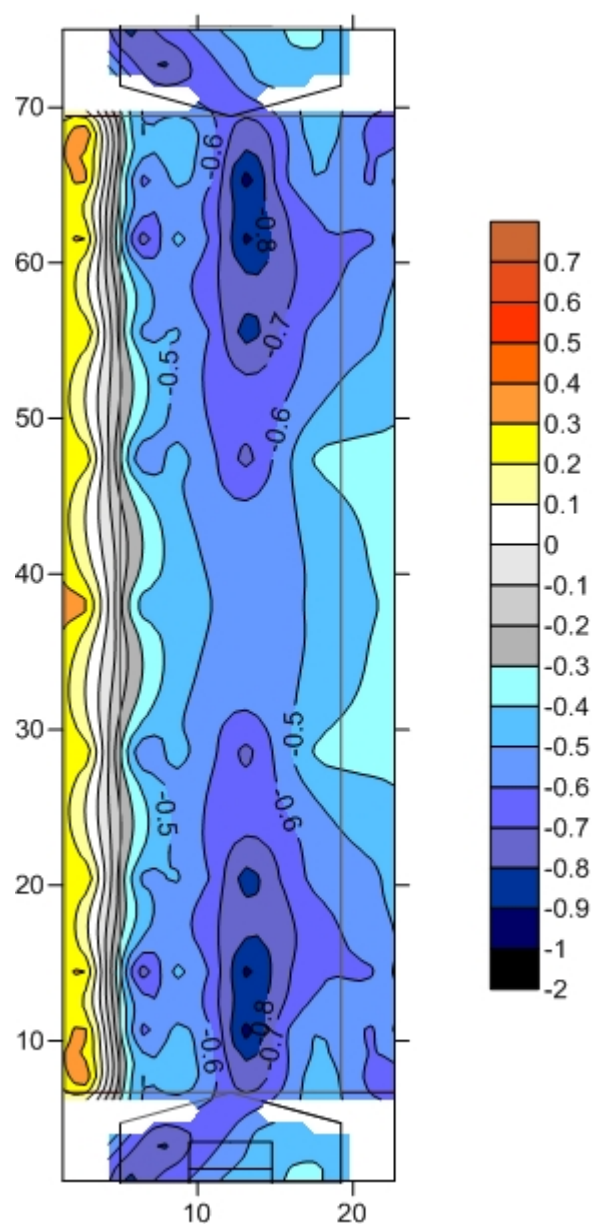
113



Mapa de isobáricas para incidência a 60°:



115



ANEXO V

```
In[1]:= "Área da entrada"
Aent=Input["Área da entrada",16.5/3]
"Maior Dimensao do Fusivel"
Lsai=Input["Maior dimensão do fusível",3]
"Menor Dimensao do Fusivel"
bsai=Input["Menor dimensão do fusível",1.064]
"CPe na entrada"
CPeent=Input["CPe na entrada",0.6]
"CPe na saída"
CPesai=Input["CPe na saída",-0.9]
"Velocidade de base"
Vb=Input["Velocidade de base",20]

Asai=Lsai*bsai;
Vent=Vent;
Vsai=Vsai;

Chi=If[Lsai==bsai,
1.5,
2];
```

```
Out[1]= Área da entrada
Out[2]= 5.5
Out[3]= Maior Dimensao do Fusivel
Out[4]= 3
Out[5]= Menor Dimensao do Fusivel
Out[6]= 1.064
Out[7]= CPe na entrada
Out[8]= 0.6
Out[9]= CPe na saída
Out[10]= -0.9
Out[11]= Velocidade de base
Out[12]= 20
```

```
In[17]:= "CPi após activação do fusível"
CPiFusivel=CPi/.NSolve[{Vsai*Asai==Vent*Aent,
(CPeent-CPi)/Chi==(Vent/Vb)^2,
(CPi-CPesai)/Chi==(Vsai/Vb)^2},
{CPi,Vsai,Vent}][[2]]
"_____ "
"Área do Fusível: [m^2]"
A=Lsai*bsai
"Descrescimo no CPi"
Dec=CPeent-CPiFusivel
"Ou seja, "
Decp=Dec/CPeent*100"%
"Factor  $\theta$ :"
 $\theta$ =CPiFusivel/CPeent
"Pressão interna antes de o fusível ceder:"
Pini=CPeent*0.5*1.25*Vb^2*10^-3 "kN/m^2"
"Pressão interna após o fusível ceder: [kN/m^2]"
Pfin=CPiFusivel*0.5*1.25*Vb^2*10^-3
"Força total actuante no fusível (para a qual o mesmo tem de ceder):"
Pfus=(Pfin+(-CPesai*0.5*1.25*Vb^2*10^-3))*A "kN"
```

```

Out[17]= CPi após activação do fusível

Out[18]= 0.222064

Out[19]= _____

Out[20]= Area do Fusivel: [m^2]

Out[21]= 3.192

Out[22]= Descrescimo no CPi

Out[23]= 0.377936

Out[24]= Ou seja,

Out[25]= 62.9893 ¢

Out[26]= Factor  $\theta$ :

Out[27]= 0.370107

Out[28]= Pressão interna antes de o fusivel ceder:

Out[29]= 0.15 kN/m^2

Out[30]= Pressão interna após o fusivel ceder: [kN/m^2]

Out[31]= 0.055516

Out[32]= Força total actuante no fusivel (para a qual o mesmo tem de ceder):

Out[33]= 0.895407 kN

In[34]:= Quit[]

```